

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**Utilização do resíduo da extração da pedra mineira
como agregado no concreto**

Wania Maria Gonçalves Pinheiro

**Campinas
2003**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**Utilização do resíduo da extração da pedra mineira
como agregado no concreto**

Wania Maria Gonçalves Pinheiro

Orientador: Prof. Dr. Vítor Antonio Ducatti

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas, SP

2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P655u	Pinheiro, Wania Maria Gonçalves Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto / Wania Maria Gonçalves Pinheiro.--Campinas, SP: [s.n.], 2003. Orientador: Vítor Antonio Ducatti Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. 1. Concreto. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Resíduos. 4. Degradação ambiental. I. Ducatti, Vítor Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.
-------	--

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como
agregado no concreto**

Wania Maria Gonçalves Pinheiro

Dissertação de mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Prof. Dr. Vítor Antonio Ducatti
Presidente e Orientador - Unicamp**

**Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos
UFJF**

**Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
Unicamp**

Campinas, 30 de julho de 2003.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Aos meus filhos

Ao meu esposo e colaborador Renildo.

*Aos que se dedicam intensamente à
pesquisa científica.*

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Que me abençoou com o interesse pela pesquisa científica, com a inspiração e com a serenidade, essenciais para a realização deste trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti, pela orientação precisa diante das dúvidas, pela confiança no meu trabalho, por ter se mostrado amigo e preocupado com o meu bom desempenho. Sua experiência e competência foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Ao Conselho Curador da FESP, Fundação de Ensino Superior de Passos, pelo apoio financeiro concedido para a realização do presente trabalho e especialmente pela valorização do profissional que busca conhecimentos e uma melhor qualificação.

Aos professores da UNICAMP na área de Edificações, pelo conhecimento que me foi transmitido, e especialmente agradeço ao Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon, pela motivação e incentivo durante as suas disciplinas e pela valiosa colaboração com esta pesquisa, através de informações e materiais.

À minha irmã Ana Paula, que colaborou de diversas formas.

Aos Engenheiros que contribuíram com materiais, equipamentos ou informações utilizadas nesta pesquisa: Marcos Funchal Nunes de Carvalho, Gaspar P. da Silva (DER/MG), Ugs de Souza Pinheiro, Silvio Adolfo (Construtora CMP), Ivana Prado Vasconcelos, Antonio Marcos Funchal e Rui Rodrigues Maia (FEP/FESP/UEMG) e Expedito Mario de Carvalho.

Aos Engenheiros Luciano e Marcelo, do Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UNICAMP, pela valiosa ajuda na realização de ensaios.

Aos estagiários do Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia de Passos Joaquim e Mateus, pela colaboração na realização dos ensaios e por terem assumido as tarefas mais pesadas.

Enfim agradeço a todas os amigos, conhecidos ou não, que de alguma forma contribuíram para a realização do presente trabalho de pesquisa.

*“... A claridade que dela emana
jamais se extingue. Com a sabedoria me
vieram todos os bens. Com todos esses
bens eu me alegrei, porque é ela que os
guia ...*

*... Porque ela é para os homens um
tesouro inesgotável, e os que a adquirem
preparam-se para se tornarem amigos de
Deus...”*

Livro da Sabedoria.

SUMÁRIO

RESUMO	xi
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	4
1.1.1 A REDUÇÃO DO CUSTO DO CONCRETO	4
1.1.2 ALTERNATIVA QUE FAVORECE O CONTROLE AMBIENTAL	5
1.1.3 ACEITAÇÃO DA PEDRA MINEIRA COMO AGREGADO NO CONCRETO ..	8
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 OBJETIVO GERAL	
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 AGREGADOS	13
2.1.1 IMPORTÂNCIA	13
2.1.2 OBTENÇÃO DOS AGREGADOS	15
2.1.3 RESÍDUO DE PEDRA MINEIRA – TAMANHO E FORMA DAS PARTÍCULAS	17
2.1.4 POROSIDADE, ABSORÇÃO E UMIDADE SUPERFICIAL	18
2.1.5 ADERÊNCIA DO AGREGADO	21
2.1.6 RESISTÊNCIA DO AGREGADO	22

2.1.7 FORMA E TEXTURA DAS PARTÍCULAS	27
2.1.8 SUBSTÂNCIAS DELETÉRIAS	30
2.1.8.1 Impurezas orgânicas	31
2.1.8.2 Argila e outros materiais finos	31
2.1.8.3 Partículas não sãs	32
2.1.9 A REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	35
2.1.9.1 O mecanismo da reação	37
2.1.9.2 Tipos de reação	39
2.1.9.3 Fatores que influenciam a reação	41
2.1.9.4 Considerações gerais sobre RAA	47
2.1.10 DIMENSÃO MÁXIMA E COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	47
2.1.11 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA DOSAGEM DOS CONCRETO	50
2.1.12 AGREGADOS COM GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA	51
2.2 A PEDRA MINEIRA	54
2.2.1 EXTRAÇÃO DA PEDRA MINEIRA	54
2.2.2 TRABALHO NAS PEDRAS	55
2.2.3 PROPRIEDADES DAS PEDRAS	57
2.2.3.1 Dureza	57
2.2.3.2 Porosidade	58
2.2.3.3 Permeabilidade	58
2.2.3.4 Cor	59
2.2.3.5 Estrutura	59
2.2.4 ROCHAS METAMÓRFICAS	60
2.2.5 O QUARTZITO	61
2.2.6 A PEDRA MINEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	63
2.2.7 A PEDRA MINEIRA COMO AGREGADO NO CONCRETO	65
2.2.7.1 Utilização da pedra mineira em blocos de concreto para alvenaria estrutural	66
2.2.7.2 Considerações sobre fatores que influenciam a resistência à compressão .	68

2.3 O AGREGADO DA PONTE DO RIO TURVO – CASO DE OBRA	71
2.3.1 A PONTE	72
2.3.2 VISTORIA INICIAL	73
2.3.3 ANOMALIAS ENCONTRADAS	78
2.3.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	80
2.3.4.1 Resistência à compressão axial	80
2.3.4.2 Análise petrográfica dos agregados	82
2.3.4.3 Avaliação da durabilidade	83
2.3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS	85
3. METODOLOGIA	87
3.1 DIRETRIZES METODOLÓGICAS	87
3.2 MATERIAIS	89
3.2.1 CIMENTOS	89
3.2.2 AGREGADO GRAÚDO	91
3.2.2.1 Amostragem da pedra mineira	91
3.2.2.2 Transformação do material	91
3.2.3 AGREGADO MIÚDO	93
3.2.4 ÁGUA	93
3.2.5 ADITIVO	93
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	94
3.3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS	95
3.3.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO	96
3.3.3 MOLDAGEM E CURA DE CORPOS DE PROVA	97
3.3.3.1 Corpos de prova cilíndricos e cúbicos – Concretos dos grupos A, B e D	97
3.3.3.2 Concreto C – Corpos de prova cúbicos com agregados pré-colocados	99
3.3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	100
3.3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	101
3.3.6 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	103
3.3.7 DOSAGENS PARA OS CONCRETOS DO GRUPO A E CONCRETO C - PRIMEIRA ETAPA	106

3.3.8 DOSAGENS PARA OS CONCRETOS DO GRUPO B – SEGUNDA ETAPA	109
3.3.9 DOSAGENS PARA OS CONCRETOS DO GRUPO A – SEGUNDA ETAPA	110
3.3.10 DOSAGENS PARA OS CONCRETOS DO GRUPO D	113
4. RESULTADOS.	117
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – PRIMEIRA ETAPA	117
4.2 DOSAGENS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS NA SEGUNDA ETAPA	124
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – SEGUNDA ETAPA	128
4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL ..	149
4.5 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO – CONCRETOS DO GRUPO A ...	156
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	167
5.1 ANÁLISE DOS AGREGADOS DE PEDRA MINEIRA	167
5.2 CONCRETOS DA PRIMEIRA ETAPA	168
5.3 CONCRETOS DA SEGUNDA ETAPA – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	169
5.4 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DOS CONCRETOS	177
5.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL ..	178
5.6 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	178
6. CONCLUSÕES	181
ANEXOS	187
ANEXO A - Caracterização Física dos Agregados	188
ANEXO B – Caracterização do Cimento	194
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197
ABSTRACT	202

RESUMO

Pinheiro, Wania Maria Gonçalves. Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 213 p. Dissertação de Mestrado.

A extração da pedra mineira no sudoeste de Minas Gerais vem causando graves problemas ambientais e elevadas despesas com descarte do imenso volume de resíduos, que chega a 80% do total extraído. O objetivo desta pesquisa foi estudar a influência da utilização deste resíduo nas propriedades tecnológicas de diversos concretos, determinando assim a sua viabilidade técnica como um agregado alternativo aos agregados convencionais. Esta aplicação para o resíduo também significa uma solução para os referidos problemas ambientais. A metodologia para fabricação dos concretos, bem como para a determinação de todas as propriedades foi de acordo com as Normas da ABNT. Os resultados mostraram que as resistências obtidas variaram de aproximadamente $\pm 15\%$, quando comparadas às resistências dos concretos com agregados convencionais. Os melhores resultados em termos de resistência foram alcançados para composições contendo de 250 a 300 kg de cimento por m^3 de concreto. Concluiu-se que o concreto com agregados de pedra mineira é tecnicamente viável, inclusive para estruturas e seu uso pode trazer para a comunidade local uma solução para um problema de impacto ambiental de potencial significativo.

Palavras-chave: concreto, agregado, resíduos, impacto ambiental.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A busca de alternativas, que venham melhorar o desempenho das edificações, ou reduzir o custo de produção das mesmas, está representada principalmente pela pesquisa científica de tecnologias e materiais novos, mais eficientes e ainda, atualmente, que não prejudiquem a natureza e tenham o mínimo consumo de energia para a sua produção.

“(...)Respeitarei a natureza, evitando projetar ou construir equipamentos que destruam o equilíbrio ecológico ou que poluam; colocarei todo o meu conhecimento científico a serviço do conforto e desenvolvimento da humanidade; assim sendo estarei em paz comigo e com Deus”. (Texto retirado do Juramento do Engenheiro).

O presente trabalho de pesquisa tem como objeto o resíduo resultante da extração do quartzito, na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, grande produtora de pisos e revestimentos obtidos destas rochas. O quartzito explorado nesta região é popularmente conhecido como “pedra mineira”. A jazida de origem do material, objeto da presente pesquisa encontra-se no município de São João Batista do Glória; o corte

das pedras é feito principalmente nos municípios de São José da Barra, São João Batista do Glória e Passos.

A presente pesquisa enquadra-se perfeitamente no texto em epígrafe, pois, além de buscar alternativas mais econômicas, pelo aproveitamento dos resíduos de pedras, obtidos a custo desprezível, visa também a melhoria ambiental, oferecendo um destino útil para o imenso volume destes resíduos (figuras 1.1 a 1.3), altamente prejudiciais ao ambiente. Manchas brancas se espalham por entre o verde das montanhas, impedindo o crescimento da vegetação, prejudicando a fauna e resultando uma paisagem desértica. O transporte do pó de pedra junto com a água da chuva provoca o assoreamento de rios e nascentes.



Figura 1.1 - Resíduos de quartzito, conhecido popularmente como pedra mineira.



Figura 1.2 – Grande volume de resíduos de quartzito depositado nas proximidades de uma jazida



Figura 1.3 - Outro exemplo do grande volume de resíduos de quartzito próximo de uma jazida.

O quartzito é uma rocha metamórfica, derivada do metamorfismo do arenito. É empregada no revestimento de pisos e paredes e se caracteriza por ser de baixa condutividade térmica, anti-derrapante e de alta porosidade. É considerado rejeito nesta atividade extrativista toda pedra que não se enquadra nos padrões comerciais, por apresentar dureza elevada, dificultando o desdobramento em dimensões comerciais e também aquelas pedras frágeis, que se desintegram com facilidade, além das sobras que resultam do seu corte.

1.1 JUSTIFICATIVA

1.1.1 A REDUÇÃO DO CUSTO DO CONCRETO

Os estudos envolvendo tecnologia do concreto, visando a melhora de propriedades e a redução dos custos, são perfeitamente justificáveis, tendo em vista que os concretos e as argamassas são produtos largamente utilizados na construção civil. Nas edificações, estes produtos podem ser considerados artigos de primeira necessidade.

Em consequência da intensidade do uso, o preço dos materiais componentes tende a crescer, caso não haja equilíbrio entre a produção e o consumo. Neste cenário, são sempre bem-vindas as pesquisas que visam a redução dos custos dos componentes do concreto, como é o caso deste trabalho experimental, que visa a redução dos custos através do emprego de agregados mais baratos, utilizados com traços mais pobres, mas resultando concreto com resistência apropriada à finalidade a que se destine, podendo ser estrutural ou não estrutural.

Pode-se deduzir que os agregados pesquisados terão seu custo menor que os usados habitualmente, tendo em vista que as pedras já se encontram semi-britadas,

com as maiores dimensões em torno de 30 cm, sendo que a maior parte das pedras do rejeito, existentes no canteiro de extração, tem pelo menos uma dimensão de aproximadamente 3 cm (figura 1.4). A figura 1.5 mostra uma grande quantidade de rejeito, produzido na fabricação dos pisos e revestimentos, tendo as pedras dimensões compreendidas entre 1cm e 20 cm aproximadamente, sendo predominante o formato de placa. Todas essas pedras, que constituem resíduo, podem ser adquiridas nos locais de extração e fabricação a custo zero.

As jazidas e fábricas de pisos e revestimentos estão localizadas tão próximas dos centros consumidores quanto as demais jazidas de produção de agregados existentes na região.

1.1.2 ALTERNATIVA QUE FAVORECE O CONTROLE AMBIENTAL

Além de buscar a redução do custo do concreto, este trabalho aponta um destino economicamente vantajoso para os fragmentos residuais de pedra mineira, os quais são geradores de problemas ambientais, acarretam despesas com descarte e provocam uma paisagem danificada, bastante desagradável, conforme se observa na figura 1.6.

O volume residual da referida extração atinge de 70% a 80% do que é extraído, segundo informações de proprietários de pedreiras. De acordo com informações da Professora Ivana Prado de Vasconcelos, que iniciou estudos visando o reaproveitamento do material residual do quartzito da região desta pesquisa, trabalhar com este nível de resíduo, de forma a dispô-lo dentro dos critérios estabelecidos pela legislação é difícil e dispendioso.



Figura 1.4 – Canteiro de extração, contendo resíduos de dimensões variando aproximadamente entre 3 cm e 30 cm.



Figura 1.5 – Local de corte da pedra, contendo resíduos com dimensões variando aproximadamente entre 1 cm e 20 cm.

Por longo tempo, os resíduos foram depositados em locais totalmente inadequados, como encostas de montanhas e nascentes, ocasionando sérios danos à vegetação, ao potencial aquífero da região e ao aspecto visual da área. Atualmente existe a obrigatoriedade do cumprimento da legislação vigente, através da fiscalização dos órgãos competentes (IBAMA, FEAM). Deve ser exigido de cada pedreira, o PRAD (Plano de Recuperação de Área Degradada), feito por técnico habilitado, no qual são estabelecidos a forma e o local adequados para a disposição e como deve ser feita a recuperação da vegetação destas áreas.



Figura 1.6 - Paisagem prejudicada pelos depósitos de resíduos de quartzito.

É claro que o atendimento das referidas exigências da legislação ambiental torna o custo operacional de produção das pedras mais elevado e este acréscimo é naturalmente repassado para o preço comercial do produto. O aproveitamento dos

resíduos no concreto irá naturalmente reduzir consideravelmente as despesas com descarte e transporte desses resíduos. Entre duas opções para solucionar o problema ambiental, ou seja, o aproveitamento dos resíduos, minimizando seu volume, ou apenas a efetiva exigência do cumprimento da legislação ambiental, a primeira é naturalmente mais racional. São grandes as possibilidades de se conseguir o custo do agregado inferior ao praticado atualmente na região, pois esses resíduos podem ser adquiridos no local da extração a custo zero, e já parcialmente fragmentados, o que reduz consideravelmente o consumo de energia para britagem.

Enfim, pode-se afirmar que a utilização desses resíduos, como agregados para concreto, irá contribuir para preservação de outras jazidas minerais, de onde são extraídas as rochas normalmente utilizadas para produção dos agregados para concreto.

1.1.3 ACEITAÇÃO DA PEDRA MINEIRA COMO AGREGADO NO CONCRETO

A definição de propriedades do concreto contendo os resíduos da pedra mineira, foi a meta deste trabalho, mas, mesmo sabendo que estas propriedades poderiam não ser as mais indicadas, de acordo com a finalidade, a utilização do resíduo seria válida considerando a necessidade de se preservar o ambiente. Além disto, não se justifica desprezar tão grande quantidade de resíduos, sabendo-se que o quartzito é uma rocha incluída entre as possíveis de utilização em concreto e foi uma das rochas pesquisadas pela Equipe de FURNAS (ANDRADE et al, 1997) como agregado para concreto.

Sabe-se através da atuação profissional da autora deste trabalho na região das jazidas, que existe uma forte rejeição quanto ao uso da pedra mineira como agregado. A idéia do pessoal envolvido com construções tal como pedreiros, mestres-de-obras, fornecedores de cascalhos e areias, é de que o material é “fraco” e não compensa o seu uso. Essa idéia pode ser um equívoco, totalmente fora da realidade.

Foi admitido no início do trabalho, que o concreto fabricado com o resíduo pesquisado poderia apresentar menor resistência à compressão, maior absorção de água, menor resistência à tração, e módulo de deformação inferior. Enfim poderia ter várias de suas propriedades alteradas com relação ao concreto com agregados convencionais. Essas alterações, entretanto, não impediriam o uso, mas seriam exigidos maiores cuidados para que se chegasse a bons resultados técnicos.

A divulgação dos resultados deste trabalho irá contribuir para uma melhor aceitação destes resíduos como agregado e incentivar a busca de novas alternativas para o concreto com agregado de pedra mineira. Essa divulgação deve vir acompanhada de indicação de serviços para os quais cada concreto é apropriado.

Um problema é que ainda não foram encontradas pesquisas anteriores a esta sobre o uso do resíduo da pedra mineira no concreto. O que se sabia, através de dados informais e através da observação da autora deste trabalho, é que os resíduos são usados, há bastante tempo, em concreto ciclópico, revestimento de paredes e pavimentação.

Foram encontrados apenas dois exemplos de utilização do quartzito como agregado no concreto estrutural: A Ponte do Rio Turvo, constituindo caso de obra abordado neste trabalho e a Usina Hidrelétrica de Furnas. Estas duas obras foram construídas na década de sessenta, há aproximadamente quarenta anos. Poucas pessoas têm conhecimento de que os agregados constituídos de pedra mineira foram componentes do concreto estrutural de obras de grande porte como estas.

Mesmo sabendo que as referidas obras apresentaram patologias no concreto e que estão passando por serviços de recuperação, pode-se admitir a possibilidade de utilização dos agregados em concreto estrutural, pois a resistência do concreto da Ponte do Rio Turvo, tem se mantido em patamares desejáveis, em média de 36 MPa e sempre superior à resistência prevista no projeto estrutural, que foi de 17 MPa. Esta

informação foi obtida no relatório emitido pelo Grupo Concremat (TIBA, 1998), após ampla pesquisa e realização de diversos ensaios referentes à Ponte.

Enfim, o presente trabalho foi feito objetivando concretos competitivos com relação aos concretos com agregados convencionais e fornece dosagens, com os respectivos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas, além de ter indicado para que tipo de elemento construtivo o concreto com pedra mineira é apropriado, de tal maneira que seu uso possa ser rotineiro nas construções, principalmente nas cidades produtoras de pedra mineira, como São João Batista do Glória, São José da Barra e Alpinópolis. É esta a principal proposta do presente trabalho de pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com utilização de resíduos da pedra mineira como agregados, fornecendo-se assim uma nova alternativa em termos de agregados para concreto, contribuindo também para a redução do impacto ambiental na região das jazidas do sudoeste de Minas Gerais.

1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Caracterização dos agregados obtidos pela britagem manual dos resíduos da exploração da pedra mineira, através da determinação da massa unitária, massa específica, absorção e granulometria.

- ❑ Estudo de dosagem dos concretos analisados, para os quais se procurou manter a consistência, medida pelo abatimento de tronco de cone, dentro dos limites de 50 e 100 mm, convenientes para a trabalhabilidade em obra.
- ❑ Determinação das seguintes propriedades mecânicas dos **Concretos do Grupo A**, para os quais o agregado graúdo foi constituído de resíduo de pedra mineira, e o agregado miúdo constituído de areia grossa de rio:
 - **Resistência à compressão;**
 - **Resistência à tração por compressão diametral;**
 - **Módulo de deformação.**
- ❑ Determinação das seguintes propriedades mecânicas dos **Concretos do Grupo B**, para os quais a totalidade dos agregados graúdos e miúdos foi constituída de resíduos de pedra mineira:
 - **Resistência à compressão;**
 - **Resistência à tração por compressão diametral.**
- ❑ Determinação da resistência à compressão do **Concreto C**, para o qual os agregados graúdos foram constituídos de resíduos, “assentados” com argamassa de cimento e areia grossa de rio, semelhante a um concreto do tipo ciclópico;
- ❑ Determinação das seguintes propriedades mecânicas dos **Concretos do Grupo D**, sendo estes concretos fabricados com agregados graúdos e miúdos convencionais, usados na região produtora de resíduos, com a finalidade de comparação com as propriedades mecânicas dos concretos contendo resíduos de pedra mineira:
 - **Resistência à compressão;**
 - **Resistência à tração por compressão diametral.**

- ❑ Estudo de caso, onde os agregados pesquisados foram usados no concreto, para avaliação da durabilidade deste concreto e verificação da existência de anomalias relacionadas ao agregado.
- ❑ Avaliação das possibilidades de destinação dos concretos obtidos, de acordo com as propriedades estudadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGREGADOS

2.1.1 IMPORTÂNCIA

Responsáveis por 60% a 80% do volume do concreto, os agregados podem exercer influência sobre a resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade desse concreto (SILVA, 1995).

Conforme relatado pela Equipe de Furnas (ANDRADE et al, 1997) o concreto massa, que utiliza agregados com dimensões máximas características acima de 38 mm tem de 75% a 85% de seu volume absoluto ocupado pelo agregado, sendo estas porcentagens reduzidas para 60% a 73% nos concretos fabricados com diâmetro máximo de 19 mm e 38 mm. Entretanto, os agregados são freqüentemente considerados como materiais de enchimento inertes e não se dá a devida importância à sua influência nas propriedades do concreto. Os agregados são bastante significativos no custo e na trabalhabilidade das misturas de concreto, o que justifica serem tratados com atenção (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Considerações importantes também foram apresentadas por NEVILLE (1997), afirmando que o agregado influencia não apenas o custo, mas principalmente a resistência, a durabilidade e o desempenho estrutural. “O agregado antes era tido como um material inerte disperso por entre a pasta de cimento, principalmente por razões econômicas. No entanto é possível adotar um ponto de vista oposto e considerar o agregado como um material de construção ligado em um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento, como uma construção de alvenaria”. O agregado não é exatamente inerte, pois suas propriedades físicas e químicas influenciam no desempenho do concreto.

A utilização do agregado não se destina, portanto, apenas à redução do custo, mas à obtenção de vantagens técnicas consideráveis, como maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura, conforme NEVILLE (1997). PETRUCCI (1978) e SILVA (1995) também afirmaram ser benéfica a influência do agregado sobre o concreto, com relação à retração e à resistência ao desgaste, ou seja, a presença do agregado diminui a retração e aumenta a resistência ao desgaste. Se o agregado for de boa qualidade, ele não prejudica a resistência mecânica, pois sua resistência é superior à da pasta de aglomerante.

Entretanto, na presente pesquisa, mesmo tendo-se conhecimento da importância do agregado nas propriedades e na durabilidade do concreto, procurou-se a definição de limites convenientes para a utilização de um agregado que, mesmo não se enquadrando em todas as características desejáveis proporcionou a obtenção de um concreto cuja resistência mecânica e trabalhabilidade são compatíveis com o seu aproveitamento em edificações.

Importante consideração foi feita por NEVILLE (1997), quando afirmou que, com um agregado cujas propriedades são todas satisfatórias se pode fazer um bom concreto, mas a recíproca não é necessariamente verdadeira e deve ser analisado o desempenho do concreto antes de se tirar conclusão sobre a qualidade do agregado. Em particular, pode ocorrer que o agregado pareça insatisfatório sob certo aspecto,

mas não cause problemas quando usado em concreto. É possível que uma amostra de rocha possa se desagregar quando submetida ao congelamento, mas nada aconteça quando envolta em concreto, especialmente quando as partículas de agregado estiverem bem cobertas por uma pasta de cimento hidratada com permeabilidade baixa.

Considerando-se que as pedras originárias dos agregados pesquisados têm baixa condutividade térmica e que as cores das pedras aproximam-se do branco, bege ou cinza claro, pode-se prever que o concreto obtido tem condutividade térmica menor que o convencional e também que é possível se obter efeitos estéticos agradáveis. Entretanto a análise térmica não faz parte da presente pesquisa, mas poderia ser uma sugestão para pesquisas futuras.

Enfim, mesmo com a resistência mecânica relativamente baixa, a utilização dos resíduos não deve ser descartada, por aliviar o problema ambiental, com perspectiva de custo destes agregados inferior ao convencional.

2.1.2 OBTENÇÃO DOS AGREGADOS

Alguns agregados são obtidos por extração direta do leito dos rios, por meio de dragas (areias e seixos), e, às vezes, de minas (areias), passando por um beneficiamento, que consiste em lavagem e classificação.

A pedra britada é obtida por redução de pedras maiores; originalmente o processo era manual. Hoje, a pedra britada é praticamente obtida por trituração em aparelhagem especial, os britadores.

Jazidas de solo grosso graduado são uma boa fonte de areia natural e pedregulho. Mas, como usualmente o depósito de solo contém quantidades variáveis

de silte e argila, que prejudicam as propriedades do concreto fresco ou endurecido, estas devem ser removidas por lavagem ou peneiramento a seco.

Geralmente, o equipamento de britagem faz parte das instalações de produção do agregado, porque frações de diâmetro acima do que é classificado como pedregulho podem ser britadas e misturadas adequadamente com material não fragmentado de tamanho similar. A escolha do equipamento de britagem pode determinar a forma das partículas. Com rochas sedimentares laminares, britadores do tipo mandíbula ou de impacto tendem a produzir partículas lamelares.

A importância da graduação apropriada do agregado no custo do concreto está hoje tão bem estabelecida, que as usinas modernas de agregados, se produzirem areia, ou pedregulho, ou pedra britada, têm os equipamentos necessários para controlar as operações de britagem, limpeza, separação granulométrica e mistura de duas ou mais frações para atender a especificações do cliente (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

PETRUCCI (1978) fez importantes considerações sobre britadores e o trabalho dessas máquinas. Para se obter o maior rendimento, com a menor despesa possível, devem elas:

- ❑ Adaptar-se às propriedades físicas da rocha;
- ❑ Possuir a desejada capacidade de produção, qualitativa e quantitativa;
- ❑ Apresentar funcionamento, conservação e reparação fáceis;
- ❑ Ser de construção simples, permitindo facilidade de montagem, desmontagem e substituição de peças.

Quanto ao trabalho de fragmentação das pedras, é evidente que quanto maior a quantidade de superfícies de corte necessárias, maior será o trabalho consumido.

Em uma época de crise energética como a atual, tornam-se relevantes os processos de produção onde o consumo energético seja mínimo. Tem-se então um indicativo para produção de agregados a partir dos fragmentos da pedra mineira, pois além desses fragmentos já estarem com dimensões reduzidas, são constituídos na maioria por placas, com uma dimensão bem próxima das dimensões usuais em agregados.

A lei de Rittinger, citada por PETRUCCI (1978), é assim enunciada:

“O trabalho de fragmentação de uma pedra é diretamente proporcional às novas superfícies produzidas”.

Os resíduos de pedra mineira propiciam novas superfícies necessariamente menores do que as de outras pedras que não tenham inicialmente a forma de placas, requisitando menor trabalho e, conseqüentemente, menos energia.

2.1.3 RESÍDUO DE PEDRA MINEIRA – TAMANHO E FORMA DAS PARTÍCULAS

Os resíduos encontrados nos canteiros de extração de pedra mineira têm geralmente forma de placas e dimensões entre 3 e 30 cm. Entretanto são encontrados resíduos com dimensões diversificadas, maiores que 1 m e menores que 1 cm. É importante destacar que a quantidade de areia e pó de pedra formada nos canteiros é imensa.

Atualmente a utilização de pedra mineira como agregado tem se limitado ao concreto ciclópico, onde as pedras de mão com dimensões geralmente compreendidas entre 10 e 40 cm são assentadas com argamassa de cimento e areia. Neste caso as pedras são coletadas, conforme relatado, no tamanho próprio para uso, a custo zero, nos canteiros de extração.

Para esta pesquisa os agregados foram britados manualmente, aproveitando-se também os resíduos de corte, pois as partículas são menores e mais fáceis de serem fragmentados. Os resíduos de corte, encontrados nas fábricas de pisos, têm geralmente forma alongada, sendo o comprimento em torno de 30 cm e as outras duas dimensões em torno de 2 cm.

2.1.4 POROSIDADE, ABSORÇÃO E UMIDADE SUPERFICIAL

O conhecimento de certas características dos agregados como, por exemplo, a composição granulométrica ou teor de umidade, é utilizado para a dosagem dos concretos. A porosidade, a composição granulométrica, a forma e textura superficial dos agregados influenciam as propriedades dos concretos no estado fresco. Além da porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta sua resistência à compressão, dureza, módulo de deformação e sanidade. Estas últimas influenciam várias propriedades do concreto endurecido contendo o agregado, tais como resistência à compressão e módulo de deformação.

A porosidade, a permeabilidade e a absorção dos agregados influenciam propriedades tais como a aderência entre agregado e pasta de cimento hidratada, resistência do concreto ao congelamento e degelo, bem como a sua estabilidade química e resistência à abrasão. A porosidade influencia também na massa específica aparente e, conseqüentemente, no volume de concreto para uma determinada massa de agregado.

A absorção e a umidade superficial do agregado são de grande importância nas pesquisas de concreto, pois estão diretamente ligadas à quantidade de água de amassamento. Para um mesmo agregado, maior absorção indica maior porosidade, maior grau de alteração e menor massa específica (ANDRADE et al, 1997).

O tamanho dos poros dos agregados é bastante variável, sendo que os maiores podem ser vistos através do microscópio e até mesmo a olho nu, mas até mesmo os menores ainda são maiores que os poros da pasta de cimento (NEVILLE, 1997). Existem poros que estão completamente no interior do sólido; outros se abrem para a superfície da partícula. A pasta de cimento, em virtude de sua viscosidade, não consegue penetrar nos poros mais profundos, a não ser nos poros maiores. Entretanto a água pode penetrar nesses poros em quantidade que depende do tamanho, continuidade e volume total desses poros. Como o agregado representa cerca de 75% do volume do concreto, torna-se evidente que a porosidade do agregado contribui para a porosidade global do concreto. A tabela 2.1 (NEVILLE, 1997) mostra valores de porosidade de algumas rochas comuns.

Na tabela 2.2 (ANDRADE et al, 1997) são apresentados os valores de massa específica e da absorção de agregados constituídos de quartzitos de diversas procedências relativas a Usinas Hidrelétricas vinculadas a Furnas Centrais Elétricas.

Tabela 2.1 – Porosidade de algumas rochas comuns.

Fonte: NEVILLE, 1997.

GRUPO DE ROCHAS	POROSIDADE %
Arenito	0,0 – 48,0
Quartzito	1,9 – 15,1
Calcário	0,0 – 37,6
Granito	0,4 – 3,8

Tabela 2.2 Massa específica e absorção de agregado graúdo de quartzito.

Fonte: ANDRADE, 1997.

Agregado	Procedência	Massa Específica (Kg/dm³)	Absorção %
Quartzito	Estreito	2,65	0,60
Quartzito	Serra da Mesa	2,80	0,75
Quartzito	Corumbá I	2,64	0,76
Quartzito maciço	Bocaina	2,63	0,43
Quartzito micáceo	Bocaina	2,50	1,22
Quartzito	Foz da Bezerra	2,64	0,70
Quartzito	Paulista	2,49	1,67

Quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há um filme de água na superfície, o agregado é dito estar na *condição saturada superfície seca (SSS)*; quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na condição úmida ou saturada. Na condição seca em estufa, toda a água evaporável do agregado foi removida pelo aquecimento a 100 °C. *Capacidade de absorção* é definida como a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca em estufa para a condição SSS; *absorção efetiva* é definida como a quantidade de água requerida para trazer o agregado da condição seca ao ar para a condição SSS.

A absorção de água do agregado é obtida determinando-se o acréscimo de massa de uma amostra seca em estufa e depois imersa em água durante 24 horas, removendo-se a água superficial. A relação entre o aumento de massa e a massa da amostra seca, expressa em porcentagem, é denominada absorção.

Embora não haja uma relação definida entre a resistência do concreto e a absorção de água do agregado, os poros da superfície da partícula influenciam na aderência entre o agregado e a pasta de cimento, podendo, portanto exercer influência sobre a resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

Geralmente se admite que no momento da pega do concreto o agregado esteja na condição saturada superfície seca. Se o agregado for misturado em condição seca, admite-se que seja absorvida água da mistura em quantidade suficiente para saturar o agregado. No entanto é possível que as partículas sejam rapidamente envolvidas com pasta de cimento, que impede a entrada de água necessária à saturação. Isso se aplica ao agregado graúdo, em que a água tem que se deslocar da superfície para o interior da partícula. Como resultado a relação água/cimento efetiva é maior do que seria caso houvesse a total absorção de água pelo agregado. Esse efeito é significativo principalmente nas misturas ricas, em que pode ocorrer rapidamente o cobrimento do agregado; em misturas mais pobres, com muita água a saturação ocorre naturalmente (NEVILLE, 1997).

O comportamento da mistura é influenciado também pela ordem de colocação dos componentes na betoneira. É interessante colocar na betoneira primeiramente os agregados graúdos, depois a água, depois o cimento e por último a areia, como foi feito na fabricação do concreto da segunda etapa da presente pesquisa.

2.1.5 ADERÊNCIA DO AGREGADO

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é um fator significativo para a resistência do concreto, principalmente para a resistência à flexão. Em parte a aderência é devida ao intertravamento do agregado e da pasta de cimento hidratada, considerando-se a aspereza da superfície das partículas do agregado. Superfícies mais ásperas resultam melhor aderência devida ao intertravamento mecânico. De acordo

com NEVILLE (1997), geralmente se obtém melhor aderência com partículas mais moles, porosas e mineralogicamente heterogêneas.

A aderência é influenciada também pela composição química e mineralógica do agregado, bem como pela condição eletrostática da superfície. Por exemplo, pode existir algum tipo de aderência química no caso do calcário, da dolomita e dos agregados silicosos, segundo NEVILLE (1997). Entretanto, pouco se sabe ainda sobre estes fenômenos. Em qualquer hipótese, é condição necessária para que se tenha uma boa aderência, que a superfície do agregado seja limpa e livre de partículas de argila.

Não existem ainda ensaios para se determinar a qualidade da aderência do agregado. Geralmente, quando a aderência é satisfatória, um corpo de prova rompido apresenta algumas partículas de agregado também rompidas, além de outras, mais numerosas, arrancadas de seus alojamentos na pasta. Um excesso de partículas rompidas pode indicar um agregado muito fraco. Como a aderência do agregado depende também da resistência da pasta de cimento hidratada, essa aderência aumenta com a idade do concreto. É importante o conhecimento da interface entre o agregado e a pasta de cimento que o envolve para a análise da ruptura do concreto, pois o agregado significa uma descontinuidade. A região da interface é rica em partículas mais finas de cimento e tem uma relação água/cimento maior do que a pasta toda.

2.1.6 RESISTÊNCIA DO AGREGADO

A resistência à compressão do concreto não pode ser significativamente maior do que a maior parte do agregado, embora não seja fácil determinar a resistência das partículas isoladas. Essa resistência é usualmente obtida de determinações indiretas: o valor da resistência ao esmagamento do agregado em fragmentos; o desempenho do agregado no concreto (NEVILLE, 1997). A estimativa da resistência, através da análise

do desempenho do agregado no concreto, significa simplesmente experiência prévia com um dado agregado, através das resistências obtidas em concretos fabricados com esse agregado. O uso experimental em um concreto, cuja resistência com agregados já utilizados é conhecida, é também uma maneira de se avaliar a resistência de outro agregado.

Em particular, se muitas partículas de agregado aparecerem rompidas, depois da ruptura do corpo de prova de concreto, poder-se-á concluir que a resistência do agregado é menor do que a resistência à compressão nominal desse concreto. Evidentemente, um agregado com esta característica poderá ser usado apenas em concretos com menor resistência.

Segundo ANDRADE et al (1997) a rocha ou alguns materiais sintéticos empregados como agregados apresentam maiores resistências à compressão e à tração do que o concreto, onde a zona de transição entre a pasta e o agregado é a parte mais fraca do sistema. Com exceção do concreto de alto desempenho, são raros os casos em que o agregado possui resistência mecânica menor do que a da pasta ou argamassa que o envolve, como certos tipos de concretos fabricados com agregados leves e alguns tipos de agregados como o micaxisto.

A resistência inadequada do agregado representa um caso limite porque as propriedades físicas do agregado têm alguma influência sobre a resistência do concreto, mesmo quando o agregado é suficientemente resistente para não se romper prematuramente. Comparando concretos preparados com agregados diferentes, pode-se observar que a influência sobre a resistência do concreto é qualitativamente igual, quaisquer que sejam as proporções da mistura, tanto em ensaios de tração como de compressão. É possível que a influência do agregado na resistência do concreto seja devida não somente à resistência mecânica do agregado, mas também à sua absorção e à aderência.

Em geral, a resistência e a elasticidade do concreto dependem da sua composição, textura e estrutura. Assim, uma resistência baixa pode ser devida à pequena resistência dos grãos constituintes ou os grãos podem ser resistentes, mas não bem ligados ou cimentados entre si.

Raramente se determina módulo de elasticidade do agregado. Isso, no entanto, não é importante porque o módulo de deformação (ou módulo de elasticidade) do concreto é, geralmente, tanto maior quanto maior o módulo dos agregados que o constituem, mas depende também de outros fatores. O módulo de elasticidade do agregado influencia na grandeza da retração e da fluência que podem ocorrer no concreto. Uma diferença muito grande entre os módulos de elasticidade do agregado e da pasta de cimento hidratada influencia de modo prejudicial o desenvolvimento de microfissuras na interface agregado-matriz.

NEVILLE (1997) considerou que um bom valor médio da resistência à compressão do agregado é cerca de 200 MPa, mas muitos agregados têm resistência de até 80 MPa. Na tabela 2.3, apresentada por NEVILLE (1997), são mostrados os valores de resistência de algumas rochas, incluindo-se o quartzito. Deve-se notar que a resistência necessária ao agregado é consideravelmente maior do que os valores normais de resistência do concreto, porque as tensões na interface das partículas podem ser muito maiores do que a tensão nominal aplicada.

Experimentos realizados pela Equipe de FURNAS (ANDRADE et al, 1997) apontaram a resistência a compressão de testemunhos de rocha, realizados com rochas de diversas litologias e de diferentes procedências (regiões onde existem barragens). Os resultados referentes a quartzitos brasileiros, estão na tabela 2.4.

Agregados com resistência e módulo de elasticidade moderados ou baixos podem ser bons para a preservação da integridade do concreto. As variações de volume do concreto, de origem hidráulica ou térmica, resultam menores tensões na pasta de cimento hidratada se o agregado for compressível. Assim, a compressibilidade do

agregado reduziria as tensões internas no concreto, ao passo que agregados rígidos e resistentes podem resultar em fissuração da pasta que os envolvem.

Tabela 2.3 Resistência à compressão de rochas americanas geralmente usadas como agregados de concreto. Fonte: NEVILLE (1997).

Resistência à compressão, MPa, após eliminação dos valores extremos				
Tipo de rocha	Número de Amostras	Valor Médio	Valor Máximo	Valor Mínimo
Granito	278	181	257	114
Felsito	12	324	526	120
Basalto	59	283	377	201
Calcário	241	159	241	93
Arenito	79	131	240	44
Mármore	34	117	244	51
Quartzito	26	252	423	124
Xisto	36	147	235	94
Gnaisse	31	170	297	91

Costumava-se especificar um ensaio para determinação da resistência à compressão de rochas com cilindros preparados. No entanto, o resultado desses ensaios é influenciado pela presença de planos de clivagem na rocha que podem não ser significativos desde que a rocha tenha sido fragmentada até os tamanhos que serão usados no concreto. Em essência, o ensaio de compressão mede a qualidade da rocha-mãe, mas não propriamente a qualidade dos agregados como usados no concreto. Por essa razão, esse ensaio é raramente usado.

Tabela 2.4 – Resistência à compressão de testemunhos de rochas quartzito

Fonte: ANDRADE et al (1997).

Agregado	Procedência	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Número de ensaios
Quartzito	Paulista	237,1	64,6	3
Quartzito	Salto Caiabís	97,8	42,9	5
Quartzito	Salto Apiacás	104,4	16,1	7
Quartzito	Serra da Mesa	54,3	44,1	11
Quartzito	Corumbá I	367,3	-	1
Quartzito	Bocaina	112,5	12,7	2
Quartzito	Serra da Mesa	68,1	20,0	2
Quartzito sacaróide	Serra da mesa	38,4	-	1

De acordo com a tabela 2.4, existe uma grande variação entre as resistências à compressão da rocha quartzito, conforme a procedência, sendo o valor mínimo de 54,3 MPa e o valor máximo de 367,3 MPa. O quartzito sacaróide apresentou resistência muito baixa, de apenas 38,4 MPa.

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade dos agregados são propriedades inter-relacionadas, que são muito influenciadas pela porosidade. MEHTA & MONTEIRO (1994) consideraram que os agregados mais comumente usados para a produção de concreto normal, são geralmente densos e resistentes; portanto raramente são um fator limitante da resistência e propriedades elásticas do concreto endurecido. Valores típicos da resistência à compressão da maioria dos granitos, basaltos, “trapps”, “flints”, arenito quartzílico e calcários densos variam de 210 a 310 MPa e o módulo de elasticidade dinâmico varia de 70 a 90 GPa. O módulo de elasticidade dinâmico, correspondente a uma deformação instantânea

muito pequena, é dado aproximadamente pelo módulo tangente inicial, que é o módulo da tangente para uma reta traçada desde a origem (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

2.1.7 FORMA E TEXTURA DAS PARTÍCULAS

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), a forma e a textura superficial são características externas do agregado que influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que endurecido. As partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento do que partículas lisas e arredondadas para se produzir misturas trabalháveis. A forma está relacionada com as características geométricas dos agregados tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Agregados de rochas intrusivas geralmente possuem vértices e arestas bem definidos e são chamados de *angulosos*. Calcários estratificados, arenitos e folhelhos tendem a produzir fragmentos alongados e achatados. Partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação às outras duas dimensões são chamadas de lamelares ou achatadas, enquanto aquelas cujo comprimento é bem maior que as outras duas dimensões são chamadas de alongadas.

Um outro termo usado para definir a forma dos agregados graúdos é a área específica volumétrica, definida como a relação entre a área superficial e o volume.

Partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas no concreto, considerando-se que a presença destas partículas aumenta o valor da área específica, e o consumo de pasta de cimento no concreto.

SILVA (1995) afirmou que os agregados de forma lamelar são difíceis de serem misturados e manuseados, exigindo uma quantidade de argamassa maior. Um excesso de areia favorece a formação de bolhas, enquanto que um concreto com pouca argamassa pode ter uma superfície isenta de bolhas. O adensamento do concreto,

contendo agregados lamelares, é mais difícil, podendo inclusive gerar ninhos de concretagem além de ter uma tendência a diminuir a aderência da pasta de cimento com o agregado, aumentando assim a permeabilidade do concreto (SILVA, 1995).

O arredondamento representa a agudeza ou angulosidade das arestas ou cantos de uma partícula. O arredondamento depende muito da resistência à abrasão da rocha mãe e das ações de desgaste a que a partícula foi submetida. No caso de agregado britado a forma da partícula depende da natureza do mineral de origem, do tipo de britador e da sua relação de redução, isto é, da relação entre os tamanhos de material que entra e do material que sai do britador. Uma classificação prática e abrangente de arredondamento é a da BS 812: parte 1: 1975, citada por NEVILLE (1997), mostrada na tabela 2.5.

O índice de lamelaridade pode ser definido como a massa de partículas lamelares, em porcentagem da massa da amostra. O índice de alongamento pode ser definido de forma semelhante.

A presença de mais de 10% ou 15%, em massa, de partículas alongadas no agregado graúdo, geralmente é considerada indesejável, mas não existem limites estabelecidos, segundo NEVILLE (1997). A Norma BS 882:1992, citada por NEVILLE (1997), limita o índice de lamelaridade do agregado graúdo em 50% para seixo natural e 40% para agregado graúdo britado ou parcialmente britado. Entretanto, para superfícies expostas a desgaste, são necessários índices menores.

Os agregados constituídos de quartzito, utilizados nos ensaios da presente trabalho de pesquisa, foram obtidos nos locais de extração e corte da pedra mineira, onde podem ser sempre encontrados quase que totalmente nas formas lamelares e alongados.

Tabela 2.5 Classificação da forma de partículas da BS 812: parte 1: 1975 com exemplos.

CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
Arredondado	Completamente erodido pela água ou pelo atrito	Seixo de rio ou de praia; areia do rio ou deserto.
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente desgastado por atrito, com cantos arredondados	Outros seixos; opalas.
Lamelar	Material em que a espessura é pequena em relação às outras dimensões	Rochas laminadas
Anguloso	Possuem arestas bem definidas formados pela interseção de faces relativamente planas	Pedras britadas em geral
Alongados	Geralmente anguloso em que o comprimento é bem maior do que as outras dimensões	
Discóide	Comprimento muito maior do que a largura e a largura muito maior do que a espessura	

DÍAZ (1998) comprovou que ao utilizar a brita de partículas lamelares em quantidade entre 16 e 31% da massa total (conservando constantes a trabalhabilidade das misturas, a energia de compactação e os teores de cimento), a influência decisiva na resistência não é a da granulometria mas da característica da forma das partículas de brita. Nas condições citadas, mantendo-se a resistência constante, a característica da forma das partículas da brita exerce uma influência muito maior no consumo de cimento do que a granulometria.

Na realização de ensaios para determinar a influência da forma dos agregados sobre a resistência dos concretos, foi possível determinar que para os agregados graúdos de forma lamelar o fator da forma é decisivo e é mais preponderante do que a granulometria. Os agregados graúdos de forma lamelar requerem uma quantidade de

areia muito maior que aquela obtida no método baseado na granulometria ideal e, conseqüentemente, uma maior quantidade de água (DÍAZ, 1998).

A textura superficial do agregado é definida pelo quanto sua superfície é lisa ou áspera e sua classificação é feita pela avaliação visual.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a textura superficial depende da dureza, granulação, e porosidade da rocha matriz e sua subsequente exposição ao atrito. Há evidências de que a textura superficial influencia na resistência do concreto à flexão, pelo menos nas primeiras idades. Uma textura mais áspera favorece a formação de maior aderência mecânica entre o agregado e a pasta de cimento. Em idades mais avançadas, a forte aderência química entre agregado e pasta de cimento é mais significativa do que a aderência mecânica.

O aumento de aderência devido à textura áspera está relacionado com o efeito das forças de natureza físico-química e com efeito de intertravamento mecânico entre agregado e pasta de cimento. Para o concreto fresco, a textura áspera vai exigir mais água, reduzindo um pouco, mas não totalmente, esta vantagem (SILVA, 1995).

2.1.8 SUBSTÂNCIAS DELETÉRIAS

Substâncias deletérias presentes no agregado são definidas como substâncias capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega, a resistência, a estética ou a durabilidade do concreto, sendo geralmente constituintes minoritários nos agregados graúdos e miúdos.

Existem três categorias de substâncias deletérias nos agregados: impurezas que interferem no processo de hidratação do cimento; películas que impedem a

aderência efetiva entre o agregado e a pasta de cimento hidratada; partículas fracas ou não sãs.

Além destas categorias, todo o agregado, ou parte dele, também pode ter efeitos deletérios envolvendo reações químicas no concreto, como por exemplo, a reação álcali-agregado (RAA).

2.1.8.1 Impurezas orgânicas

Se o agregado contiver impurezas orgânicas que possam interferir com as reações químicas da hidratação do cimento, ele pode não ser satisfatório para o uso em concreto, mesmo se sua resistência for suficiente (NEVILLE, 1997). A matéria orgânica encontrada nos agregados geralmente aparece sob a forma de húmus e argila orgânica. Esses materiais são encontrados com mais frequência na areia do que nos agregados graúdos, que são facilmente laváveis. Este tipo de impureza não aparece nos agregados pesquisados, inclusive os agregados miúdos resultantes da britagem manual das pedras.

2.1.8.2 Argila e outros materiais finos

Uma boa aderência entre o agregado e a pasta de cimento é fundamental para a resistência e durabilidade do concreto. A argila que pode estar presente no agregado na forma de películas superficiais, interfere nesta aderência entre o agregado e a pasta de cimento.

Segundo NEVILLE (1997), existem dois tipos de material fino: o silte e o pó de pedreira. O silte é o material entre 2 μm e 60 μm , reduzido a este tamanho por intemperismo, sendo encontrado geralmente nos agregados naturais. O pó de pedreira é um material fino formado durante o processo de fragmentação da rocha para obtenção da pedra britada.

Argilas e siltes têm dois inconvenientes principais: recobrando os grãos do agregado prejudicam a aderência; tendo grande área superficial exigem água em demasia na sua aplicação, aumentando assim a relação água/cimento e prejudicando a resistência do concreto (PETRUCCI, 1978).

Em vista disso é necessário controlar os teores de argila, silte e pó de pedra nos agregados. A BS 882:1992, citada por NEVILLE (1997), estabelece um limite para o teor máximo de material passante na peneira 75 μm :

- ❑ Em agregado graúdo: 2%, ou até 4% quando só de pedra britada;
- ❑ Em agregado miúdo: 4%, ou até 16% quando só de pó de pedra;
- ❑ No agregado total: 11%.

A ASTM C 33-93, citada por NEVILLE (1997), recomenda 3% de partículas passantes na peneira 75 μm quando o concreto for submetido à abrasão e 5% nos demais casos. Para agregado graúdo o limite é 1%, mas são feitas várias exceções. Na mesma norma o teor de argila em torrões e de partículas friáveis é especificado separadamente em 3% para agregado miúdo e 2% a 10% para agregado graúdo, dependendo do uso do concreto.

A norma brasileira NBR 7219/87 prescreve o método de determinação de material pulverulento no agregado. A determinação do teor de argila e de materiais friáveis pode ser feita pela norma NBR 7218/87. A norma NBR 7211/83 – Especificações de Agregados para concreto estabelece limites para os teores desses materiais praticamente iguais aos da ASTM.

2.1.8.3 Partículas não sãs

A quantidade de partículas não sãs deve ser naturalmente limitada. Existem dois tipos de partículas não sãs: aquelas que não conseguem manter a integridade, ou

friáveis, e aquelas que resultam em expansão e desagregação quando expostas ao congelamento ou mesmo à água.

A mica deve ser evitada porque influencia de modo adverso a demanda de água e a resistência do concreto. FooKes e Rovic, citados por NEVILLE (1994), determinaram que um teor de 5% de mica provocou a redução de aproximadamente 15% na resistência do concreto aos 28 dias, mesmo mantendo constante a relação água/cimento. A razão provável disso pode ser a aderência insuficiente entre a pasta de cimento e a superfície das partículas de mica.

A tabela 2.6 mostra as quantidades admissíveis de partículas não são estabelecidas pela ASTM C 33-93, citada por NEVILLE (1994).

Tabela 2.6– Teores admissíveis de partículas não são. Fonte: ASTM C-33-93

TIPO DE PARTÍCULAS	Agregado miúdo, Máximo.,. %	Agregado graúdo Máximo.,. %
Partículas friáveis e torrões de argila	3,0	2,0 – 10,0 ^a
Carvão	0,5 – 1,0 ^b	0,5 – 1,0
Calcedônia facilmente desintegrável	-	3,0 – 8,0 ^c

^a Incluindo calcedônia;

^b Dependendo do aspecto;

^c Dependendo da exposição.

Sanidade do agregado é o termo usado para definir a capacidade do agregado resistir às variações excessivas de volume devidas às alterações das condições físicas, tais como congelamento e degelo, variações térmicas (acima da temperatura de

congelamento) e molhagem e secagem alternadas. Diz-se que o agregado não é são, quando as variações de volume proveniente dessas causas resultam deterioração do concreto (NEVILLE, 1997). Essa deterioração pode ser desde um escamamento localizado até fissuração generalizada da superfície e uma desintegração até uma profundidade considerável, podendo gerar uma simples aparência desagradável até situações estruturalmente perigosas.

Os agregados obtidos de rochas porosas, tais como arenitos, calcários e xistos, estão sujeitos ao desenvolvimento de pressões internas por ocasião do congelamento, mas nem todos os agregados porosos são suscetíveis a dano pelo referido congelamento. O comportamento de uma partícula de agregado quando exposta a ciclos gelo-degelo, depende basicamente do tamanho, número e continuidade dos poros (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

NEVILLE (1997) considerou que os ensaios disponíveis para determinação da sanidade do agregado não fornecem uma indicação precisa do comportamento do agregado, nas condições reais de variação de umidade e temperatura acima do ponto de congelamento. Não existem também ensaios para prever satisfatoriamente a durabilidade do agregado no concreto exposto a congelamento e degelo (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE 1997). A principal razão disto é que o comportamento do agregado é influenciado pela presença da pasta de cimento hidratada que o envolve. Somente a observação do desempenho em serviço pode demonstrar satisfatoriamente a durabilidade do agregado.

Um outro tipo de expansão dos agregados, diferente da ocasionada pela falta de sanidade, é a causada pela Reação Álcali-Agregado, envolvendo os agregado e os álcalis do cimento.

2.1.9 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação que envolve os álcalis provenientes geralmente do cimento, agregados reativos e ocorre na presença de água.

A Usina Hidrelétrica de Furnas, localizada a 30 Km da cidade de Passos, é um exemplo de obra que convive atualmente com os efeitos da RAA. Conforme visita realizada pela autora, foram afetados principalmente o vertedouro, tomadas d'água e casa de força. Os locais mais atingidos por RAA passaram por serviços de recuperação. Segundo informações do Engenheiro Fernando, responsável pela execução do serviço, o agregado utilizado para construção da Usina foi obtido da rocha quartzito, encontrada em abundância na região e produzido através de britagem no local da extração. O agregado estudado na presente pesquisa é originado da mesma rocha, cujas jazidas estão localizadas na mesma região.

A figura 2.1 mostra um pilar de sustentação da comporta, que foi atingido pela RAA e recentemente reforçado através de capeamento com argamassa armada, sendo utilizado o cimento de alto forno CP III da marca Barroso, conforme informado pelo engenheiro responsável. Segundo ele o controle de qualidade dessa argamassa é rigoroso e a resistência à compressão é de 60 MPa, conferida por ensaios de laboratório. A mesma recuperação está sendo feita no pilar ao lado, onde são nítidas as fissuras produzidas por RAA (figura 2.2).

Outro exemplo de ocorrência de RAA é o observado na Ponte do Rio Turvo, onde os agregados são também constituídos de quartzito e extraídos na mesma região dos agregados utilizados na Usina de Furnas. A utilização do quartzito como agregado na Ponte do Rio Turvo será relatada no tópico 2.3 do presente trabalho, como caso de obra.



Figura 2.1 Pilar da Usina de Furnas, recuperado após deterioração por RAA.



Figura 2.2 Fissuras provocadas por RAA em pilar da Usina de Furnas, passando por recuperação.

É importante salientar que as duas obras citadas foram construídas há aproximadamente 40 anos, sem qualquer tipo de prevenção contra a RAA e estão nas piores condições de umidade para o desenvolvimento de patologias no concreto, ou seja, estão constantemente em contato com a água. Mesmo assim, depois de tantos anos, as estruturas se apresentam com resistência aceitável e em condições de serem recuperadas.

Os principais sintomas decorrentes da RAA são: microfissuras no concreto; fissuras nas proximidades da superfície dos agregados graúdos, podendo também ocorrer na interface; presença de gel exsudando ou preenchendo vazios do concreto; fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão, podendo ser confundida com o panorama de reação por sulfato ou até mesmo retração por secagem, quando as fissuras são de pequena abertura e com fissuração de origem térmica quando as fissuras são de grande abertura (ANDRIOLO et al, 1999).

A ocorrência de fissuração pode determinar a perda de estanqueidade, pois permite o transporte de elementos agressivos junto com a água, para o interior do elemento de concreto.

2.1.9.1 O mecanismo da reação

Trata-se de uma reação química envolvendo íons alcalinos do cimento Portland, íons hidroxila e certos constituintes que podem estar presentes no agregado, podendo resultar expansão e fissuração, pipocamentos e exsudação de um fluido viscoso (álcali-silicoso para reação álcali-sílica) (MEHTA, 1994).

ANDRIOLO (1999) relatou que alguns constituintes mineralógicos dos agregados reagem com os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto. Estes hidróxidos alcalinos são derivados geralmente dos álcalis sódio e potássio do cimento Portland, mas os referidos álcalis podem, ocasionalmente serem

derivados de outras fontes. Um dos produtos formados na reação é o gel higroscópico expansivo, cuja composição química inclui sílica, álcalis e ocasionalmente uma pequena quantidade de cálcio.

Esta reação é uma das causas de deterioração de estruturas localizadas em ambientes úmidos, tais como barragens, fundações e pilares de pontes e estruturas marinhas. A intensidade do fenômeno, sua velocidade e grandeza das deformações dependem de muitos fatores, entre os quais:

- ❑ Quantidade e características dos agregados reativos utilizados;
- ❑ Níveis de álcalis do cimento;
- ❑ Temperatura;
- ❑ Disponibilidade de umidade;
- ❑ Dosagem do concreto;
- ❑ Permeabilidade da pasta de cimento hidratada, pois ela controla o deslocamento da água e dos íons envolvidos na reação e também o deslocamento do gel de sílica, que é um produto da reação;
- ❑ Presença de adições minerais.

Os álcalis do concreto são provenientes principalmente do cimento portland, mas podem também ser provenientes da água de amassamento (águas alcalinas, como a água do mar), de pozolanas e até mesmo de agregados (PAULON, 1981).

A reação começa com o ataque dos minerais silicosos do agregado pelos hidróxidos alcalinos resultantes principalmente dos álcalis do cimento. Os íons hidroxila atacam a superfície da sílica resultando um gel de álcali-silicato nos planos mais fracos ou poros do agregado ou na superfície das partículas de agregado. No último caso forma-se uma zona de alteração superficial característica, que pode destruir a aderência entre o agregado e a pasta que o envolve (NEVILLE, 1997).

O gel absorve água com uma conseqüente tendência a aumento de volume. Como o gel é confinado pela pasta de cimento hidratada resulta uma pressão interna que pode eventualmente resultar em expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento. A expansão pode ser devida à pressão hidráulica, mas também pode ser causada por inchamento dos produtos sólidos da RAA (NEVILLE, 1997).

A disponibilidade contínua de água junto ao concreto causa o aumento e a progressão das microfissuras, que finalmente atingem a superfície externa do concreto. O padrão das fissuras é irregular, sendo, portanto referidas como fissuras mapeadas (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Um breve resumo do processo da RAA, desde a formação do gel até a fissuração, foi apresentado por FERRARIS (2000), adaptado por VALDUGA (2002), conforme figura 2.3.

2.1.9.2 Tipos de reação

A reação álcali agregado pode apresentar-se de três formas, de acordo com os agregados envolvidos:

- ❑ Reação álcali-sílica;
- ❑ Reação álcali-silicato;
- ❑ Reação álcali-carbonato.

A Reação álcali-silicato é a que mais acontece no Brasil, tendo-se como exemplo as Barragens de Paulo Afonso, Joanes e ainda a Barragem de Furnas e a Ponte do Rio Turvo, onde foram usados os agregados constituídos por quartzitos semelhantes aos estudados neste trabalho de pesquisa. TIBA (1998) afirmou que a reação ocorrida com os agregados da Ponte do Rio Turvo foi a do tipo álcali-silicato.

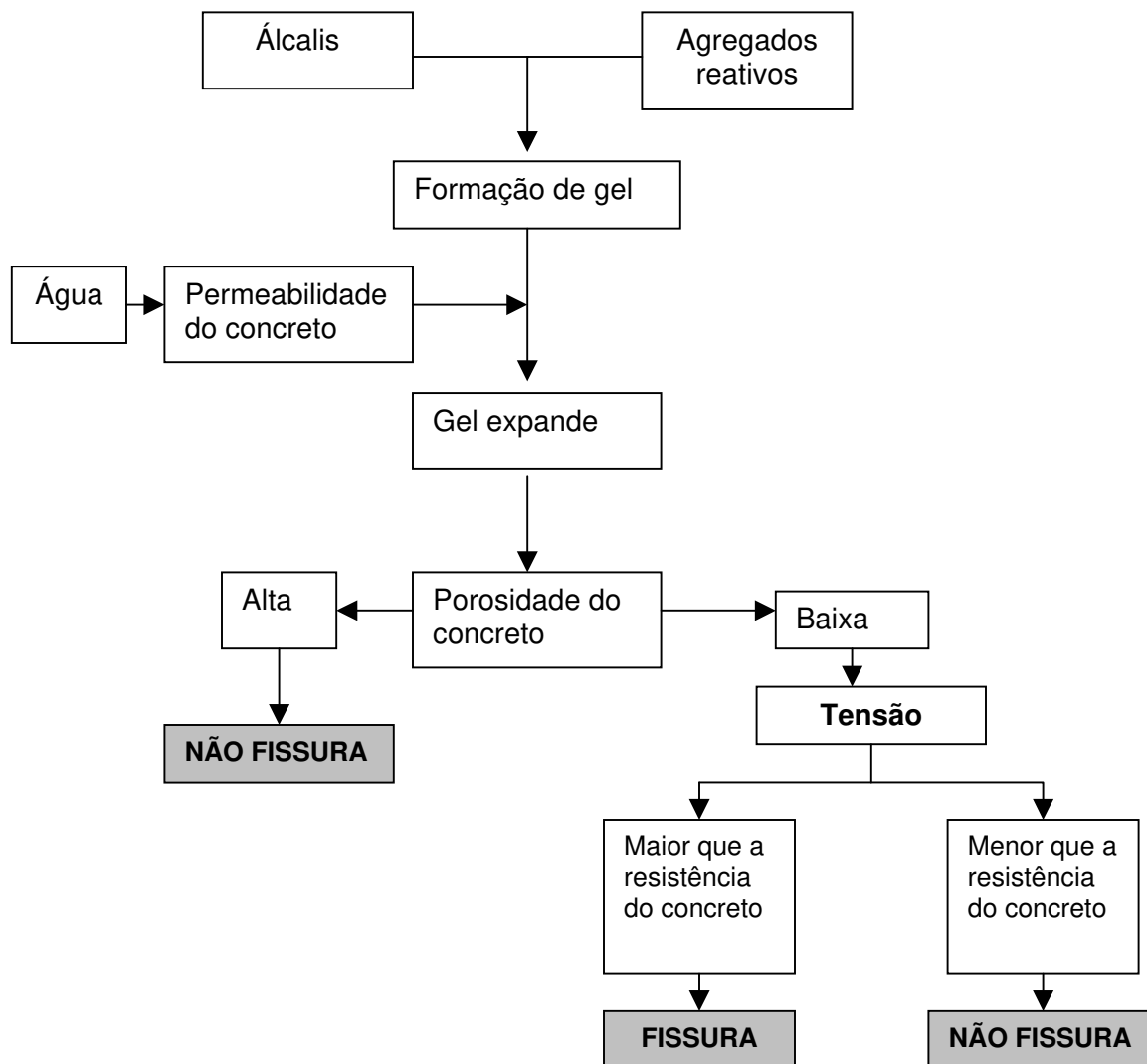


Figura 2.3 Resumo do processo da reação álcali agregado. Adaptado de FERRARIS (2000).

A reação álcali-silicato acontece entre as hidroxilas e silicatos presentes em diversas rochas como argilitos, siltitos, folhelhos argilosos, que são rochas sedimentares; gnaiss e quartzitos, que são rochas metamórficas e granitos, que é uma rocha magmática. É muito semelhante com a reação álcali sílica, sendo porém mais lenta em virtude dos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz (VALDUGA, 2002).

Alguns autores consideram a reação álcali-silicato como uma forma de reação álcali-sílica. Ficam então apenas dois os tipos de reação.

2.1.9.3 Fatores que influenciam a reação

Teor de álcalis do cimento

Acredita-se que se o conteúdo alcalino do cimento for menor que 0,6%, não ocorrem danos provenientes de RAA, independentemente dos agregados reativos (METHA & MONTEIRO, 1994; SOUZA & RIPPER, 1998). Entretanto em concretos contendo um consumo muito alto de cimento há possibilidade de ocorrência de danos até para conteúdo de álcalis menor que 0,6%. Investigações na Alemanha e Inglaterra mostram que conteúdo total de álcalis menor que 3 kg/m³ provavelmente não causam danos por RAA (METHA & MONTEIRO, 1994).

Segundo PAULON (1981) o limite de 0,6% deve ser assumido como um critério insuficiente de segurança contra a RAA. A concentração de álcalis é decisiva para a ocorrência de reação e depende do conteúdo de álcalis do cimento, do suprimento de álcalis das circunvizinhanças e dos consumos de água e cimento do concreto.

Enfim, não se pode garantir a não ocorrência de RAA, através do controle de álcalis do cimento.

Agregados

Com relação a agregados reativos a álcalis, dependendo do tempo, temperatura e tamanho da partícula, todos os silicatos ou minerais de sílica, bem como sílica hidratada (opala) ou amorfa (obsidiana, vidro de sílica) podem reagir com soluções alcalinas, embora vários minerais reajam apenas em um grau insignificante. Entre as rochas deletérias reativas a álcalis estão os **quartzitos** e quartzos fraturados, tensionados e preenchidos por inclusões (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Analisando-se o tamanho das partículas, há indícios de que partículas menores produzem maiores expansões, segundo HOBBS (1988).

Entretanto se as partículas forem muito pequenas (da ordem de microns) pode haver uma situação diferente. Segundo PAULON (1981), agregados reativos de dimensões muito reduzidas provocam uma reação profunda e total antes que o gel tenha se formado. Grandes quantidades de materiais finos, devido a sua grande superfície específica, provocam redução rápida na concentração de álcalis, de tal forma que os agregados maiores não tenham oportunidade de sofrer as reações secundárias que provocam a formação do gel expansivo.

Umidade e temperatura

Conforme já relatado, uma das condições necessárias para a ocorrência da reação é a presença de umidade. Diversos autores consideram que a umidade relativa deve estar em torno de 80%.

Para que haja reação a umidade mínima no interior do concreto deve ser de cerca de 85% a 20º C. Em temperaturas mais altas, a reação pode ocorrer em umidades mais baixas (NEVILLE, 1997).

A permeabilidade do concreto tem papel decisivo na ocorrência da reação e é influenciada pela estrutura de poros da pasta de cimento. A estrutura de poros representa a quantidade e tamanho de poros. A porosidade aberta, ou seja, quando os poros estão interconectados, possibilita o transporte de líquidos ou gases para o interior da massa do concreto, facilitando a ocorrência da RAA.

Molhagem e secagem alternadas intensificam a migração de íons de álcalis, que se deslocam da parte molhada para a parte mais seca, favorecendo a reação. Um gradiente de umidade tem efeito semelhante.

Adições minerais

O emprego de adições minerais no concreto, entre outros benefícios, produz aumento da impermeabilidade e da resistência por refinamento dos poros e, como resultado da redução da alcalinidade, uma durabilidade maior considerando ataques químicos, tais como águas sulfatadas e expansão álcali-agregado (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A adição de pozolanas, desde que em quantidades adequadas, pode inibir ou mesmo evitar a reação e poderá ser um recurso, sempre que não houver outros meios de evitar a reação deletéria (SILVA, 1995). Esse autor considerou que, quando forem empregados agregados deletérios, com possibilidade de ocorrência de RAA, deve-se empregar, preferencialmente, os seguintes cimentos:

- ❑ Cimento Portland pozolânico com teor de pozolana entre 15% e 50%;
- ❑ Cimento Portland de alto forno com teor de escória superior a 60%
- ❑ Cimento Portland com baixo teor de álcalis (Na_2O e K_2O).

PAULON (1981) concluiu em seus estudos que a ação de pozolana adequada pode ser considerada como efetiva na inibição do efeito expansivo nas reações álcali-silica e álcali-silicato. Uma pozolana de baixo teor de álcalis reduz o teor de álcalis da mistura cimento-pozolana, enquanto que, a maior parte das hidroxilas disponíveis reagem preferencialmente com a pozolana, em virtude da sua superfície específica que é maior que a superfície do agregado reativo.

As adições minerais que inibem a RAA são, segundo MEHTA (1994), a escória granulada de alto forno, vidro vulcânico (pedra pome moída), argila calcinada, cinza volante e microssilica.

A cinética e o mecanismo de hidratação da escória no concreto resultam uma reação lenta, baixa liberação de calor e desenvolvimento resistência mais lento do que

o produzido pelo cimento portland sem adição da escória. Os produtos resultantes da reação se apresentam eficientes no preenchimento dos poros capilares grandes, melhorando consideravelmente a impermeabilidade do concreto (JAIN & PAL, 1998).

Estudos de PAULON et al (1982), citados em VALDUGA (2002) mostram o efeito de pozolana brasileira na inibição da RAA. O gráfico da figura 2.4 mostra a redução na expansão devida à reação álcali-sílica, em virtude de substituição de 30% do material cimentício por pozolana. As figuras 2.5 e 2.6 mostram os blocos moldados com material reativo, sendo que o bloco onde não foi usada a pozolana apresenta-se fissurado.

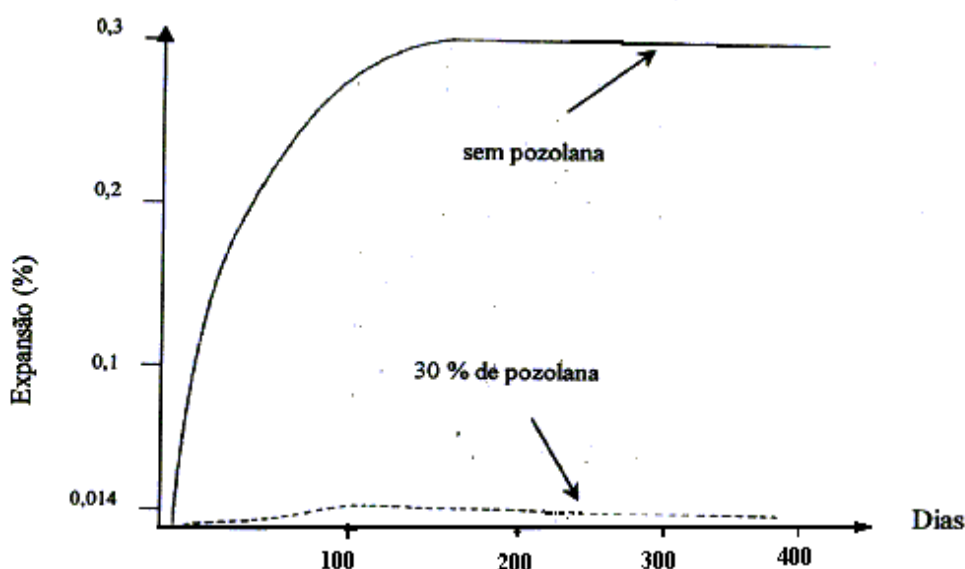


Figura 2.4 – Redução da Expansão devido à reação álcali-sílica por utilização de pozolana.

Fonte: PAULON et al (1982).

O emprego de material pozolânico no concreto de obras de grande porte no país ganhou importância e foi implementado em razão de pesquisas desenvolvidas durante a construção de Jupiá, em trabalho conjunto com a CESP, em 1963 (ANDRIOLO et al, 1999).

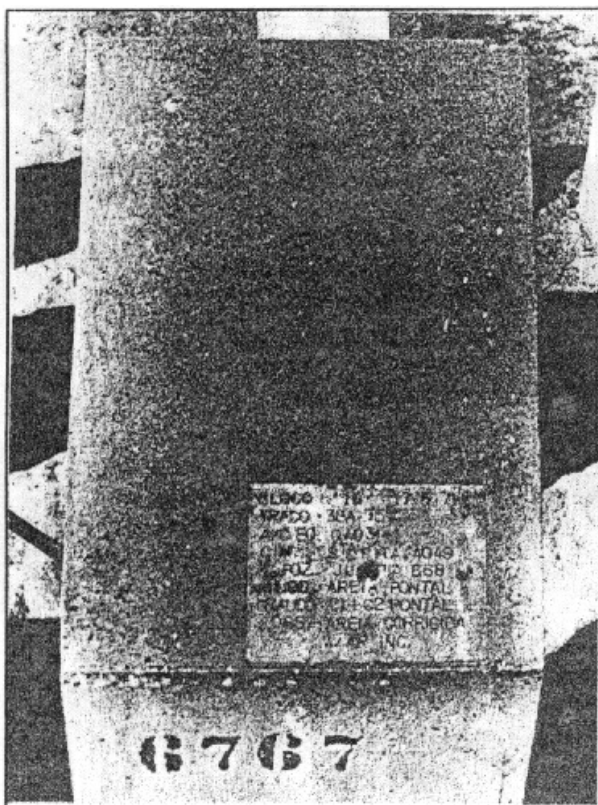


Figura 2.5 – Concreto com 30% de pozolana
Fonte: PAULON et al (1982)

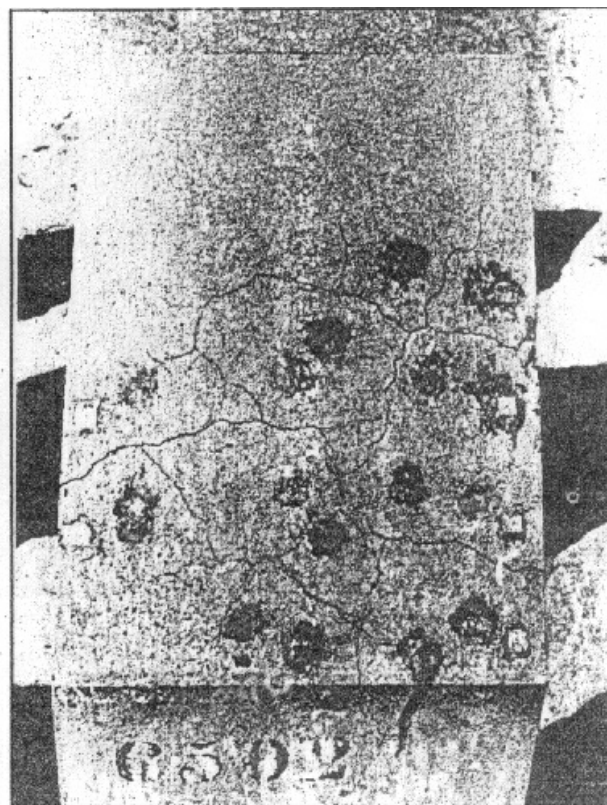


Figura 2.6 - Mesmo concreto sem pozolana
Fonte: PAULON et al (1982)

A pesquisa com o agregado disponível e mais econômico para a obra – seixo rolado com a predominância de calcedônia e quartzito – revelou tratar-se de material altamente reativo com os álcalis. Foram tomadas providências no sentido de inibir o processo reativo, adotando-se inicialmente o uso de cimento portland com baixo teor de álcalis, da ordem de 2%. A solução definitiva foi o uso de cimento portland com adição de pozolana artificial (ANDRIOLO et al, 1999).

Nas hidroelétricas da CESP que se seguiram à construção de Jupia, utilizou-se material pozolânico nos concretos como medida profilática à reação álcali agregado e não se tem qualquer ocorrência do processo reativo em suas barragens. Os materiais pozolânicos também foram usados nas UHEs Itaipu e Tucuruí, as maiores usinas do Brasil.

A influencia da substituição de cimento portland por escória granulada de alto forno pode ser observada através de experiência de HOBBS (1988), onde barras de argamassa foram confeccionadas com agregados reativos. Foi observada redução nas expansões de todas as barras contendo escória granulada de alto forno.

A ASTM C 33, citada por MEHTA & MONTEIRO (1994), exige que “agregado para uso em concreto que será submetido à imersão em água, exposição prolongada a atmosfera úmida, ou contato com solo úmido, não deve conter quaisquer materiais que sejam potencialmente reativos com os álcalis do cimento, em quantidade suficiente para causar expansão; a menos que tais materiais estejam presentes em quantidades desprezíveis o agregado pode ser usado com um cimento contendo menos de 0,6% de álcalis, ou com a adição de um material que seja capaz de evitar a expansão nociva da reação álcali-agregado”.

Esta exigência da ASTM e principalmente a valiosa orientação fornecida pelo Professor Vladimir A. Paulon, autor e orientador de diversos trabalhos sobre reação álcali-agregado, motivaram a utilização, nesta pesquisa, do cimento CP-III, como medida preventiva da referida reação.

Não se pode esquecer que o uso de adições pode causar efeitos, como por exemplo, uma resistência inicial menor. Os possíveis efeitos devem ser, portanto avaliados.

Teor de ar incorporado

Concretos confeccionados com agregados reativos apresentaram, segundo HOBBS (1988), expansões não deletérias, com o gel preenchendo vazios originados pelo ar incorporado. O ar incorporado pode reduzir os danos causados pela RAA, pois havendo mais “espaço” para os produtos da reação, o risco de fissuração é reduzido. As tensões no concreto resultantes da RAA surgem no momento em que o gel tenta se expandir e sofre a restrição imposta pela massa do concreto. Se houver possibilidade

de expansão através dos vazios gerados pelo ar incorporado, as tensões podem não acontecer, ou podem acontecer com intensidade que não supere a resistência do concreto, não gerando fissuração.

2.1.9.4 Considerações gerais sobre RAA

Pode-se afirmar que a RAA é uma reação lenta, sendo que uma maneira eficaz de impedir os efeitos deletérios da reação é a utilização de cimento contendo mais de 60% de escória granulada de alto-forno. Trata-se de uma patologia que pode ser evitada através da prevenção.

Existem fortes indícios apontados neste trabalho de que os agregados estudados, constituídos de quartzito, são reativos a álcalis, mas os referidos indícios não foram confirmados através de ensaios, os quais não fizeram parte dos objetivos da pesquisa. Agregados extraídos na mesma região de origem dos agregados pesquisados foram confirmados como reativos. Entretanto, VALDUGA (2002) afirma que em uma mesma região podem existir diferentes tipos de material quanto à potencialidade reativa.

Enfim, mesmo admitindo a potencialidade reativa dos agregados pesquisados, não se justifica descartar os agregado por este motivo. Se a utilização estiver de acordo com orientações técnicas, no sentido de neutralizar os efeitos negativos da RAA, o concreto terá durabilidade e será provavelmente mais econômico. Foram informadas neste trabalho diversas alternativas, além da utilização da escória de alto-forno, que possibilitam a prevenção e o controle diante da possibilidade de RAA.

2.1.10 DIMENSÃO MÁXIMA E COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A razão mais importante para a especificação de limites granulométricos e da

dimensão máxima dos agregados é a sua influência na trabalhabilidade e no custo do concreto. Por exemplo, areias muito grossas produzem misturas de concreto ásperas e não trabalháveis, e areias muito finas aumentam o consumo de água (portanto, o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento) e são antieconômicas; agregados que não têm uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, em especial, produzem as misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

A dimensão máxima do agregado é, convencionalmente, designada pela dimensão da abertura da peneira na qual ficam retidos 15% ou menos das partículas do agregado (MEHTA & MONTEIRO, 1994). A Norma Brasileira NBR 7217/1987 define esta porcentagem, para definição da dimensão máxima em 5%. Em geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, que tem que ser coberta pela pasta de cimento, para uma dada relação água/cimento.

Desde que o preço do cimento é, usualmente, cerca de dez vezes (em alguns casos até mesmo vinte vezes) mais caro que o preço do agregado, qualquer ação que possa economizar cimento sem reduzir a resistência e a trabalhabilidade do concreto, pode resultar em um benefício econômico significativo. Além do aspecto econômico, há outros fatores que governam a escolha da dimensão máxima do agregado para uma mistura de concreto. De acordo com uma regra prática, usada pela construção civil, a dimensão máxima do agregado não deve ser maior que um quinto da dimensão mais estreita da fôrma na qual o concreto será colocado; também não deve ser maior que três quartos da menor distância livre entre as armaduras de reforço. Como partículas maiores tendem a produzir mais microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, nos concretos de alta resistência a dimensão máxima do agregado é limitada a 19 mm.

É também usual o cálculo do *módulo de finura*, definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras usadas no ensaio conforme norma. Quanto mais fino o agregado, menor é o módulo de finura. PETRUCCI (1978) definiu o

módulo de finura como a soma das porcentagens de grãos retidas acumuladas nas peneiras da série normal (excluídos os valores correspondentes às peneiras intermediárias), dividido por cem.

$$MF = \frac{\% \text{ retidas acumuladas}}{100} \quad (01)$$

São as seguintes as aberturas da malha das peneiras empregadas na análise granulométrica dos agregados graúdos:

<i>Série normal</i>	<i>Intermediária</i>
<i>19 mm</i>	<i>25 mm</i>
<i>38 mm</i>	<i>50 mm</i>
<i>75 mm</i>	<i>100 mm</i>
<i>150 mm</i>	

O módulo de finura é um parâmetro importante na análise granulométrica e representa o tamanho médio das partículas. Entretanto, um mesmo módulo de finura pode ser correspondente a diversas curvas granulométricas, sendo útil para detectar pequenas variações de um agregado de mesma origem e também para dar indicação de um comportamento provável de uma mistura feita com o agregado correspondente àquele módulo de finura.

Neste trabalho, a granulometria dos agregados foi definida de acordo com a Norma Brasileira NBR 7217/1987.

A produção de blocos estruturais de concreto, indicada neste trabalho como recomendada para o uso da pedra mineira, é feita com agregados miúdos semelhantes aos usados nos concretos convencionais. Deve ser adicionada aos agregados miúdos uma pequena proporção de agregado graúdo, com dimensão máxima característica de no máximo 9,5 mm (PRUDÊNCIO JR. et al 2002). Este tipo de mistura de agregados

graúdos e miúdos é semelhante ao “pedrisco” utilizado nos ensaios desta pesquisa e definido no capítulo “Metodologia”, item 3.3.

2.1.11 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem do concreto representa o proporcionamento adequado dos materiais constituintes – cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e eventualmente aditivos, para produção de concreto que atenda a certas especificações prévias. Entre essas especificações, a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido a uma certa idade normalmente representam os requisitos mais importantes. A durabilidade é outra propriedade importante, sendo que, as condições de exposição do concreto em serviço devem ser consideradas.

Outro fator determinante no processo de dosagem é o custo. O concreto é considerado econômico quando consegue atender às exigências de projeto com o mínimo consumo de cimento, que se constitui um material com custo muitas vezes superior ao do agregado e água. Existem diversas alternativas, visando a redução do custo do concreto, como por exemplo a utilização de agregados graúdos com as maiores dimensões possíveis. Entretanto essa regra de ouro vale apenas para concretos considerados correntes, com $f_{ck} \leq 30$ MPa (HELENE & TERZIAN, 1993). O emprego de aditivos redutores de água se constitui uma medida eficiente, principalmente quando o concreto necessita de maior fluidez e esse emprego de aditivo evita o aumento de água na mistura. É claro que o custo do aditivo deve ser considerado.

Outro fator a ser considerado é o tipo de agregado disponível economicamente. Nem sempre é possível dispor-se no local da obra de agregados ideais quanto à forma e textura e que também não apresentem reatividade com os compostos hidratados da pasta de cimento (HELENE & TERZIAN, 1993). As características de forma e textura

dos agregados influenciam na quantidade mínima de água para obtenção da trabalhabilidade desejada e sua eventual reatividade pode ser combatida com emprego de cimentos pozolânicos ou de baixo teor de álcalis.

A trabalhabilidade do concreto fresco representa a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva e deve ser compatível com as condições de trabalho, para que as propriedades do concreto endurecido, tais como resistência, durabilidade e aparência sejam asseguradas. A compatibilidade entre as características ótimas do concreto fresco e as características do concreto endurecido não é facilmente obtida. A tabela 2.7 (HELENE & TERZIAN, 1993) mostra a necessidade de um compromisso entre o ótimo e o possível, pois existem parâmetros importantes que evoluem em sentidos opostos quando se pretende resistência ou trabalhabilidade.

Tabela 2.7 Sentido da evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo. Fonte: HELENE & TERZIAN (1993).

Parâmetros de dosagem do concreto	Concreto fresco	Concreto endurecido	Para redução do custo
	Para uma boa trabalhabilidade	Para uma boa resistência	
Granulometria do agregado miúdo	De preferência fina	De preferência grossa	Grossa
Relação grão/miúdo	A diminuir	A aumentar	A maior possível
Consumo de água	A aumentar até certo ponto	A diminuir	A aumentar
Granulometria total	Preferível contínua	Preferível descontínua	A disponível
Dimensão máxima característica do agregado	De preferência média	De preferência pequena	A maior possível
Geometria do grão de agregado grão	De preferência esférica	De preferência irregular (brita)	Esférica (pedregulho)

A utilização de agregados mais baratos em uma mistura, sendo mantido o proporcionamento entre todos os materiais constituintes de outra mistura feita com agregados de preço comercial, resulta inevitavelmente uma redução do custo do concreto. Entretanto, o benefício desta redução só é confirmado se a resistência obtida e a trabalhabilidade verificada forem as mesmas do concreto feito com o agregado mais caro, ou ainda se a resistência alcançada for menor, mas ainda suficiente para a finalidade desejada. Este tipo de análise se constituiu uma das propostas do presente trabalho de pesquisa.

2.1.12 AGREGADO COM GRANULOMETRIA DESCONTÍNUA

De acordo com NEVILLE (1997), as partículas de agregado de um certo tamanho se acomodam de modo a formarem vazios que podem ser preenchidos somente se o tamanho inferior seguinte for pequeno o suficiente, isto é, se não houver interferência de partículas. Isso significa que deve haver uma diferença mínima entre os tamanhos de duas frações contíguas de partículas. Não podem ser usados tamanhos pouco diferentes e isto justifica a utilização do agregado com granulometria descontínua.

Granulometria descontínua pode ser definida como uma granulometria na qual faltam uma ou duas frações intermediárias. O termo *granulometria contínua* é usado para definir uma granulometria convencional, quando necessário para diferenciá-la de uma granulometria descontínua. No presente trabalho foi utilizada a granulometria descontínua.

Em uma curva granulométrica a descontinuidade é representada por um trecho horizontal, na região onde faltam tamanhos de agregados. Em alguns casos, a descontinuidade entre 10,0 mm e 1,18 mm pode ser adequada. Neste caso os agregados miúdos, passantes na peneira de 1,18 mm, poderiam entrar facilmente nos

vazios do agregado graúdo, melhorando a trabalhabilidade (NEVILLE, 1997). A omissão de alguns tamanhos pode reduzir o número de montes de agregados no estoque, gerando economia e maior facilidade na execução do concreto.

SHACKLOCK, citado por NEVILLE (1997) mostrou que usando agregado com granulometria descontínua, mantendo a relação água/cimento e a relação agregado/cimento, se obtém maior trabalhabilidade com menor teor de agregado miúdo do que usando agregados com granulometria contínua. Entretanto, a granulometria descontínua gera maior tendência à segregação.

Observa-se que existe uma certa descontinuidade mesmo quando se usam agregados comuns. O concreto com agregados de granulometria descontínua é difícil de ser bombeado devido ao risco de segregação e não é adequado para pavimentação com fôrmas deslizantes.

O agregado tanto com granulometria contínua como descontínua pode ser usado para se produzir um bom concreto, mas em cada caso deve ser estudada a fração correta de agregado miúdo. Não se deve procurar uma granulometria ideal, mas sim achar a melhor combinação possível dos agregados disponíveis.

Os agregados com granulometria descontínua podem ser usados na maioria dos concretos, dentre os quais dois deles são interessantes e podem se adaptar aos concretos estudados na presente pesquisa:

- ❑ Concreto com agregado pré-colocado, conforme concretos moldados durante este trabalho de pesquisa;
- ❑ Concreto com agregados expostos, que poderia ser usado na confecção de blocos, com finalidade decorativa, pois se obtém um acabamento muito agradável, devido a grande quantidade de um só tamanho que fica exposto após o tratamento. Esse tipo de concreto, entretanto, não faz parte dos objetivos deste trabalho.

2.2 A PEDRA MINEIRA

A rocha de origem dos agregados da presente pesquisa, popularmente conhecida como pedra mineira, foi qualificada como quartzito por pesquisadores vinculados à entidade Furnas Centrais Elétricas.

O potencial econômico do quartzito foi descoberto no início dos anos 50 e foi intensificado nos anos 70. Atualmente, a pedra é exportada para a Europa e Japão, sendo a atividade geradora de renda e impostos para o estado, mas paralelamente pode acarretar muita destruição, se o imenso volume de resíduos não tiver uma destinação apropriada, conforme destacado neste trabalho de pesquisa.

2.2.1 EXTRAÇÃO DA PEDRA MINEIRA

As pedreiras têm lugar à flor da terra, sendo a exploração de pedra mineira feita a céu aberto, por escavações superficiais e também por explosões com dinamite. Segundo VERÇOZA (1975), na exploração a céu aberto dá-se preferência às pedreiras situadas em encostas, porque há maior facilidade no desmonte e também no transporte. Normalmente, apenas parte dos blocos aparece à superfície; a maior parte da pedreira fica encoberta por terra.

Desmonte é o trabalho de extrair a pedra de seu leito natural, para utilizá-la na construção. O desmonte da pedra mineira é feito com ferramentas manuais, sendo também utilizadas máquinas escavadoras e explosivos.

Tratando-se de rochas com planos de clivagem, a exploração é feita com o uso da força humana, auxiliada por ferramentas simples, após o uso dos explosivos, inevitáveis para atender a demanda crescente pelo produto. Entre as ferramentas utilizadas estão as talhadeiras, brocas, os ponteiros, malhos e outras.

2.2.2 TRABALHO NAS PEDRAS

As pedras são extraídas para serem usadas na forma de pedaços irregulares (brita, lascas) ou em formas regulares (pedra aparelhada ou cantaria). Chama-se aparelhamento das pedras à regularização de suas superfícies para formar a cantaria ou blocos regulares. No caso da pedra mineira, a maior parte das peças extraídas não tem dimensões ou dureza convenientes para serem aparelhadas com equipamentos elétricos. Essas pedras constituem um excepcional volume de rejeito, em torno de 70 a 80% do total extraído, abandonado nas proximidades do local de extração, conforme mencionado no capítulo 1 da presente pesquisa.

O aparelhamento das pedras pode ser manual, mecânico ou misto. Geralmente este último tipo é o predominante. No caso da pedra mineira o aparelhamento é iniciado manualmente, na própria pedreira. Depois as pedras são transportadas para as diversas fábricas de pisos e revestimentos onde é terminado o aparelhamento com utilização de serras mecanizadas. A figura 2.7 mostra uma máquina usada para aparelhamento das pedras. A figura 2.8 mostra pedras já cortadas e prontas para o comércio (ao fundo) e também resíduos formados no corte.



Fig. 2.7 – Máquina usada para corte da pedra mineira.



Figura 2.8 – Pedras cortadas e prontas para o comércio ao fundo; resíduos de corte à frente.

Para obtenção de pedra britada, inicia-se por reduzir a pedra a volumes que possam entrar nas britadeiras. Normalmente, $1,0 \text{ m}^3$ de rocha fornece de $1,3$ a $1,4 \text{ m}^3$ de pedra britada. Procura-se usualmente adotar um canteiro de trabalho em encosta, para que se possa ter transporte por gravidade, aumentando assim o rendimento econômico (VERÇOZA, 1975). Considerando esta afirmação, o local de exploração da pedra mineira é favorável à produção de britas.

2.2.3 PROPRIEDADES DAS PEDRAS

VERÇOZA (1975) definiu *pedras naturais* como “corpos sólidos, minerais, não maleáveis, incombustíveis, geralmente de densidade superior à da água, constituídos por substâncias terrosas puras ou combinadas, e endurecidas de modo que não amoleçam pela ação da água”.

A seguir estão definidas propriedades que mais influenciam no emprego das pedras na construção. Algumas propriedades das rochas já foram definidas neste trabalho como propriedades dos agregados (porosidade, massa específica, absorção, resistência).

2.2.3.1 Dureza

É a medida da facilidade com que as pedras se deixam riscar. Uma das escalas mais usadas para definir a dureza é a escala de Mohs, onde são estabelecidos dez tipos de pedras como padrões, em dureza crescente, conforme tabela 2.8 (VERÇOZA, 1975). Nessa escala cada número risca o inferior, mas não risca o superior. Para se obter a dureza de Mohs de determinada pedra, verifica-se até qual das pedras padrões ela risca. O número do último padrão riscado representa a dureza. Entretanto não há proporcionalidade nesta escala.

Tabela 2.8 – Escala de Dureza Mohs

Fonte: VERÇOZA, 1975.

1	Talco	Podem ser riscados pela unha
2	Gipso	
3	Calcita	Podem ser riscados pelo canivete
4	Fluorita	
5	Apatita	
6	Ortoclásio	Não são riscados pelo canivete; riscam o vidro.
7	Quartzo	
8	Topázio	
9	Coríndon	
10	Diamante	

O quartzito pesquisado tem dureza variável. A maior parte das pedras não são riscadas pelo canivete, mas existem algumas friáveis e algumas que são riscadas pelo canivete.

2.2.3.2 Porosidade

Na época de formação das pedras, o esfriamento deixa, pela contração, poros e fendas intercristalinas, que influenciam no comportamento de cada tipo de pedra (VERÇOZA, 1975). A porosidade pode ser definida como o volume de vazios por unidade de volume de rocha em estado natural. Pode ser expressa em porcentagem.

2.2.3.3 Permeabilidade

A facilidade com que a água pode circular através dos vazios das pedras, sob influência apenas da gravidade, é chamada *permeabilidade*. **Não é o mesmo que absorção.** As argilas, por exemplo, tem elevada porosidade e baixa permeabilidade,

pois os poros são muito pequenos e a água adere por capilaridade não mais circulando (VERÇOZA, 1975).

2.2.3.4 Cor

A cor de uma pedra depende de sua composição. Segundo (VERÇOZA, 1975) os corantes normalmente são os seguintes: ferro (amarelo, vermelho ou preto), manganês (castanho ou vermelho), cromo (verde, amarelo ou vermelho), carbono (preto ou cinza), sílica (verde), cálcio (branco).

O brilho é a aparência da superfície sob efeito da luz refletida. O brilho pode ser metálico, vítreo, sedoso, gorduroso, adamantino (como diamante) e outros.

O quartzito que leva o nome de pedra mineira é encontrado principalmente na cor branca, sendo mesclado pelas cores cinza claro e amarelo.

2.2.3.5 Estrutura

A estrutura da rocha pode ser, conforme (VERÇOZA, 1975):

Compacta: com a massa densa e uniforme;

Granular: formada de grãos;

Grosseira: com grãos desiguais;

Cristalina: com os cristais aparentes;

Porfíróide: os cristais, grandes, estão imersos em massa compacta;

Sacaróide: os cristais são pequenos, com aspecto de açúcar;

Lamelar: forma de lâminas;

Xistóide: com grandes lâminas

Terrosa: com aspecto de terra;

Fibrosa: disposta em fibras regulares;

Raiada ou venada: com veios;

Amigdalóide: com cavidades cheias de substâncias estranhas.

Entre os tipos de estrutura definidos a lamelar e a xistóide são as que aparentemente caracterizam a pedra mineira.

2.2.4 ROCHAS METAMÓRFICAS

As rochas metamórficas são aquelas derivadas de outras preexistentes que sofreram mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado sólido, ou seja, sem que haja fusão dos minerais componentes da rocha. Essas mudanças mineralógicas ocorrem em resposta a alterações das condições físicas (temperatura e pressão) e químicas impostas em profundidades abaixo das zonas superficiais de alteração e cimentação (FRASCÁ, 1998). O fenômeno que origina tais transformações é chamado *metamorfismo*.

Essas alterações provocam a instabilidade dos minerais, que tendem a se transformar e se rearranjar sob as novas condições. Pode ocorrer desde a recristalização mineral até reações metamórficas mais intensas. A recristalização, que compreende o aumento de tamanho e/ou a modificação na forma externa, é um fenômeno predominante nas rochas monominerálicas como calcários e quartzo arenitos, que passam para mármore e quartzitos, respectivamente (FRASCÁ, 1998).

Segundo POPP (1998), quando o sedimento original é formado por minerais com pouca tendência ao desenvolvimento de formas lamelares por cristalização (como é o caso do quartzo e da calcita), ou quando o metamorfismo se dá sem pressões orientadas, as estruturas que se formam não são orientadas e denominam-se *estruturas granulares* – características de rochas como quartzitos, mármore etc.

2.2.5 O QUARTZITO

O quartzito é uma rocha derivada do metamorfismo do arenito. Os grãos de quartzo da constituição original iniciam um crescimento na superfície, invadindo os interstícios. Forma-se uma textura granular imbricada. O eventual cimento argiloso do arenito transforma-se em muscovita. Sua cor é branca, rósea ou vermelha. A variedade flexível do quartzito é chamada itacolomito (LEINZ, 1980). Segundo POPP (1998) o itacolomito é uma rocha cujos minerais presentes são o quartzo e a mica, tendo cor clara, xistosidade friável e flexível.

Xistosidade é o arranjo planar de minerais micáceos em xistos, filitos e outras rochas (FRASCÁ, 1998).

POPP (1998) também definiu quartzito como rocha proveniente do metamorfismo dos arenitos e por isso pode ser confundido com eles. A principal diferença é a presença de minerais micáceos. Os quartzitos são mais duros e, quando quebrados, os minerais de quartzo são seccionados ao meio, enquanto nos arenitos eles apenas se deslocam permanecendo inteiros. A fratura nos quartzitos é também mais áspera. Os quartzitos apresentam grande variedade de cor e aspecto, pois a rocha original nem sempre é um arenito puro. O quartzito tem cores claras, xistosidade fraca ou ausente e tem a presença dos minerais quartzos e às vezes cloritas ou serecitas.

RODRIGUES (1978) relatou que os quartzitos provêm da evolução de areias. O quartzo é, pois, o mineral principal. Daí o nome da rocha. Se o cimento era bom, ou se durante o metamorfismo ele endureceu, a rocha terá grande dureza. Areias silicificadas, isto é, com sílex depositado entre seus poros, são das rochas mais duras da natureza. O quartzito devia ser uma rocha branca, de vez que o quartzo é um mineral incolor. Às vezes, entretanto, seu cimento dá-lhes cores mais escuras.

São rochas muito resistentes à erosão, devido à alta resistência do quartzo, seu constituinte principal. Decompostas, geram solos arenosos, pobres para a lavoura, mas ótimos para estradas. Os carros passam bem, mesmo após grandes chuvas, como acontece nas estradas sem pavimentação, que dão acesso às jazidas da pedra mineira, estudada na presente pesquisa. Além disso, tem bom índice de suporte para pavimento (RODRIGUES, 1978).

RODRIGUES, (1978), observa ainda que, para engenheiros, quartzitos dão solos em geral bons para estradas e fundações. Para os agrônomos, em geral, grande “porcaria”. Entre os quartzitos paulistas, alguns são maciços, isto é, extraordinariamente compactos, mas outros estão pulverizados ou facilmente se deixam pulverizar. Ambos os tipos aparecem, às vezes, lado a lado na mesma pedreira, como acontece nas jazidas da pedra mineira estudada.

Os quartzitos são rochas formadas quase que exclusivamente de quartzo recristalizado, em geral derivados de sedimentos silicosos, como quartzo arenitos ou cherts. Têm cor branca, com variações para vermelha (pela presença de hidróxidos de ferro) ou tons de amarelo (quando há filossilicatos: sericita). São rochas bastante duras, com altas resistências à britagem e ao corte em serras diamantadas. São também muito resistentes à alteração tanto intempérica como hidrotermal (FRASCÁ, 1998).

A cor predominante do quartzito é o branco, podendo ter também tons de rosa ou verde. Os minerais essenciais são quartzo e sericita (FRASCÁ, 1998).

Os **mica quartzitos**, popularmente denominados **pedra mineira**, são utilizados para revestimento de pisos (FRASCÁ, 1998). Essa afirmação é um indicativo de que os agregados pesquisados podem ser constituídos em parte por mica quartzitos, dependendo da jazida de onde foram retirados.

Analisando-se todas as considerações anteriores, sobre características do quartzito, pode-se afirmar que tem semelhança com as características das pedras

objeto da presente pesquisa, confirmando-se as informações de que a rocha existente na região trata-se de quartzito.

Entretanto a definição de ***mica quartzito e itacolomito*** são pertinentes para uma parcela significativa das pedras.

Através da observação de quantidade significativa de fragmentos residuais, extraídos de diversos trechos de exploração, em datas diversificadas, podem-se afirmar as seguintes características:

- ❑ Cor predominante é o branco, mesclado por tons cinza e amarelo;
- ❑ Algumas pedras são bastante duras, altamente resistentes ao corte e à britagem;
- ❑ Outras pedras, em menor quantidade, são friáveis, flexíveis e se deixam facilmente pulverizar.

2.2.6 A PEDRA MINEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Furnas, localizada sobre terreno constituído parcialmente por pedra mineira, é um exemplo marcante de utilização desta pedra, tanto como agregado, como para revestimento e pavimentação.

Ao longo dos anos, a utilização da pedra mineira tem se intensificado, como revestimento decorativo de fachadas e para pavimentação de áreas de lazer. As figuras 2.9 (site www.paraisdaspedras.com.br) e 2.10 (site www.vatan.com.br/hlrpedra1) ilustram a utilização da pedra mineira como piso.

Na cidade de Alpinópolis, situada a poucos quilômetros das jazidas de origem do material pesquisado, existem também diversas fábricas de pisos e revestimentos de pedra mineira e diversas jazidas onde a referida pedra é explorada.



Figura 2.9 – Piso de pedra mineira.



Figura 2.10 – Utilização da pedra mineira em pavimentação de área de lazer.

O uso da pedra como agregado, aproveitando-se o rejeito das pedras aceitas para revestimento e piso, limita-se atualmente ao concreto ciclópico em bases de edificações. A intensificação do uso da pedra como agregado, conforme proposta do presente trabalho, beneficiaria as cidades produtoras, através do aproveitamento de agregados que já se encontram nas respectivas cidades, sendo o pesado custo do transporte praticamente eliminado. No caso de Alpinópolis existem jazidas ao lado da cidade e as empresas responsáveis pela aparelhagem e comercialização do material estão localizadas no perímetro urbano.

2.2.7 A PEDRA MINEIRA COMO AGREGADO NO CONCRETO

A utilização da pedra mineira como agregado no concreto ao longo dos anos, excetuando-se o concreto ciclópico, não foi constatada na região das jazidas do sudoeste de Minas Gerais. Entre as razões deste fato, pode estar a existência de partículas que se desintegram facilmente incluídas na massa de resíduos, o que causa a falsa impressão de que o material é impróprio para concretos.

Um fato interessante observado por ocasião dos ensaios foi a desintegração da maior parte das partículas friáveis durante o processo de britagem manual dos resíduos, transformando-se essas partículas em material fino, o qual é separado das britas com maior dureza e integridade por ocasião do peneiramento. Entretanto foi observado durante a pesquisa que os agregados de resíduos de pedra mineira não atendem a todos os requisitos estabelecidos por norma, como por exemplo a porcentagem de partículas lamelares e porcentagem de finos.

A Norma Brasileira NBR 7211/83 prevê o seguinte para agregados que não atendam a todos os requisitos por ela definidos:

“Para os agregados sobre os quais não existem antecedentes de desempenho, ou que vão ser utilizados pela primeira vez, ou para as regiões em que não seja economicamente possível a obtenção de agregados que preencham as condições desta Norma, o consumidor poderá utilizá-los desde que se comprove, mediante parecer, baseado em estudo experimental, que com os agregados disponíveis poder-se-á produzir concreto de qualidade satisfatória”.

Os agregados constituídos de resíduo de pedra mineira podem não atender a todos os requisitos da Norma NBR 7211/83, mas, de acordo com essa mesma Norma, os agregados podem ser aceitos desde que sejam feitos ensaios para verificar a resistência do concreto constituído por estes agregados.

Os concretos pré-moldados se constituem uma opção favorável ao aproveitamento do resíduo, pois o controle de qualidade é mais fácil em uma fábrica do que em uma obra. A utilização do cimento CP-III como inibidor da RAA, a cura submersa e a otimização da dosagem com inclusão de aditivos determinam a maior eficiência do material. Tal situação é mais fácil de ser atingida em uma fábrica ou em uma central de concreto do que em um canteiro de obra.

2.2.7.1 Utilização da pedra mineira em blocos de concreto para alvenaria estrutural

Uma possibilidade particularmente interessante entre os concretos pré-moldados é a fabricação de blocos para alvenaria estrutural, pois não há necessidade de resistência à compressão e módulo de deformação elevados. PRUDÊNCIO JR. et al (2002) destacaram que, quanto maior o módulo de deformação do concreto dos blocos, menor é a resistência da alvenaria: como o módulo de deformação da argamassa da junta é geralmente baixo, blocos muito rígidos elevam a tensão de tração na interface bloco/argamassa.

Os blocos para alvenaria estrutural de concreto devem ter absorção máxima de 10%, pois valores acima desse limite indicam blocos porosos, com baixa resistência mecânica e tendência a absorver rapidamente a água da argamassa de assentamento das alvenarias (PRUDÊNCIO JR. et al, 2002). Entretanto, blocos com absorção muito baixa são também inconvenientes, pois quase não succionam água da argamassa, prejudicando a aderência junta-bloco. A falta de absorção também prejudica o enrijecimento das juntas podendo dar causa a desalinhamentos e desaprumos. Diante desse fato, o concreto com agregado de pedra mineira, para o qual pode ser prevista uma absorção maior que o concreto convencional, pode ser considerado apropriado para a confecção de blocos, analisando-se a absorção.

A norma brasileira que fixa as condições exigidas para aceitação dos blocos estruturais de concreto é a NBR 6136/1994 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – Especificações.

A resistência à compressão é a propriedade mais importante do bloco de concreto e seu controle deve ser feito com o máximo de rigor. Os ensaios devem ser feitos de acordo com a norma brasileira NBR 7184/1992 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Determinação de resistência à compressão – Método de ensaio.

Segundo PRUDÊNCIO JR. et al (2002), o valor característico da resistência à compressão do bloco, referente a um lote, pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$f_{bk.est} = 2 (f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bm-1} / (m - 1) - f_{bm}) \quad (2)$$

Onde:

$f_{bk.est}$ = resistência à compressão característica estimada de um lote, em MPa;

n = número de blocos da amostra;

$m = n / 2$, se “ n ” for par;

$m = (n + 1) / 2$ se “n” for ímpar;

f_{bi} = resistência dos blocos à compressão, ordenados em ordem crescente, isto é, f_{b1} é o menor valor e f_{bn} o maior valor, em MPa.

Adotar para $f_{bk.est}$ valor até no máximo 0,85 da média dos blocos da amostra e no mínimo $\psi_6 \times f_{b1}$, sendo ψ_6 fornecido pela tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Valores de ψ_6 em função do tamanho da amostra (n)

n	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
ψ_6	0,89	0,91	0,93	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01

Os lotes de blocos devem ser formados por conjuntos de blocos com as mesmas características, produzidos sob as mesmas condições e com os mesmos materiais. Nenhum lote pode ter mais de 100.000 blocos. A amostragem deve ser feita retirando-se de cada lote, blocos inteiros ao acaso.

O lote deve ser aceito sempre que a resistência característica do bloco à compressão obedecer aos valores de sua classe. Os valores mínimos de $f_{bk.est}$ variam de 4,5 até 16 MPa. Por exemplo, para classe de resistência 6 o valor mínimo é de 6 MPa.

Os valores típicos de resistência para blocos são compatíveis com as resistências esperadas para o concreto com agregados de pedra mineira, sempre superiores a 12 MPa.

2.2.7.2 Considerações sobre fatores que influenciam a resistência à compressão

Para as etapas de fabricação do concreto e também durante os ensaios de determinação de resistência à compressão, foi importante considerar as informações de

HELENE & TERZIAN (1992), relativas aos fatores que influenciam as referidas resistências. A análise dos resultados foi também facilitada por estes dados.

A uniformidade do concreto decorre da uniformidade apresentada pelos agregados, cimento e aditivos usados, pois todos estes materiais influenciam na resistência final obtida. A produção do concreto é um processo mecânico passível de apresentar dispersão em torno de um valor médio. Dispersões na coleta de exemplares, moldagem, cura, capeamento e ruptura dos corpos de prova podem introduzir variações na resistência que não correspondem a variação do concreto na estrutura (HELENE & TERZIAN 1992).

A tabela 2.10 apresenta a lista dos principais fatores responsáveis pela variabilidade da resistência à compressão, indicando-se a máxima variação que cada um poderá causar na resistência de controle do concreto. Foram consideradas variabilidades normais, geralmente encontrada em materiais do mesmo tipo e procedência. A troca de classe de cimento ou erros grosseiros na proporção dos materiais, ou na mistura, ou nas operações de ensaio não estão computados.

É bastante improvável que esses efeitos possam ser somados, mas é possível a ocorrência de mais de um fator ao mesmo tempo. Observa-se que a maior parte das variações causam redução na resistência e os aumentos de resistência são de no máximo 15%.

Tabela 2.10 – Principais fatores que influenciam o resultado da resistência à compressão potencial do concreto medida no ensaio de controle. Fonte: HELENE & TERZIAN, 1992.

Causas da variação	Efeito máximo no resultado
A – Materiais ☐ Variabilidade da resistência do cimento ☐ Variabilidade na quantidade total de água ☐ Variabilidade nos agregados (principalmente miúdos)	$\pm 12\%$ $\pm 1\%$ $\pm 12\%$
B – Mão-de-obra ☐ Variabilidade do tempo e procedimento da mistura	- 30%
C – Equipamento ☐ Ausência de aferição da balança ☐ Mistura inicial, sobre e subcarregamento, correias, etc.	- 15% -10%
D – Procedimentos de ensaio ☐ Coleta imprecisa ☐ Adensamento inadequado ☐ Cura (efeito considerado aos 28 dias ou mais) . ☐ Remate inadequado dos topos ☐ Ruptura (velocidade de carregamento)	- 10% - 50% $\pm 10\%$ - 30% para concavidade - 50% para convexidade $\pm 5\%$

2.3 O AGREGADO DA PONTE DO RIO TURVO – CASO DE OBRA

Em complementação à pesquisa bibliográfica sobre a Pedra Mineira, a inclusão de caso de obra, veio dar o respaldo necessário ao presente trabalho de pesquisa, para que se chegasse a uma conclusão subsidiada não apenas em ensaios de laboratório, mas na situação real dos agregados, como componentes do concreto de uma obra em serviço.

A Ponte do Rio Turvo, estrutura de grande porte em serviço há mais de trinta anos, se constitui um exemplo de peso para uma avaliação detalhada e segura sobre o desempenho dos agregados, considerando-se não apenas a resistência, mas também a durabilidade. Sabendo-se que há tempos a ponte vem apresentando problemas sérios de deterioração e que os agregados graúdos são constituídos de quartzito, extraído na mesma região dos agregados pesquisados, a decisão foi imediata: o presente trabalho não poderia ser finalizado sem o conhecimento detalhado dos problemas que tivessem relacionamento com os agregados em questão.

Os trabalhos realizados pela Empresa Concremat – Engenharia e Tecnologia S. A., através de relatório técnico gentilmente cedido pelo DER – MG, Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (TIBA, 1998), possibilitaram a análise pretendida dos agregados, fundamentada em resultados decisivos sobre a atuação destes agregados em serviço. Esses trabalhos compreenderam observações, verificações, ensaios e estudos realizados para elaboração de um Projeto de Recuperação e Reforço da Ponte sobre o Rio Turvo.

2.3.1 A PONTE

Localizada na Rodovia MG – 050, ligando a cidade de Passos a Belo Horizonte, a ponte fica no trecho entre as cidades de São José da Barra e Capitólio, na região onde é explorada a pedra mineira.

O levantamento geométrico efetuado pela Concremat (TIBA, 1998) mostra que a estrutura da ponte, com 290 m de comprimento e 8,30 m de largura, tem seu corpo central formado por torres altas, com altura máxima de 37,30 m, contraventadas nas duas direções. Os pilares têm seção retangular de 60 x 60 cm nos módulos superiores e 60 x 75 cm nos trechos de engastamento nos blocos rasos de fundação, em concreto ciclópico, assentados em rocha fragmentada.

No topo das cinco torres foram construídos tabuleiros com três vigas de concreto armado convencional, vencendo o vão da torre de 8 m e com balanço para cada lado de 2,5 m, que suportam com dentes gerber, tabuleiros em grelha compostos por três vigas protendidas de 20 m de vão, travadas pelas lajes e transversina central.

Foram construídos viadutos de acesso nas duas extremidades deste corpo central, no sistema de duas vigas principais de concreto armado, travadas por transversinas como suporte de uma laje central retangular e balanços laterais. Esses trechos, de um lado com vãos de 9,7 m e na outra extremidade com 8,85 m foram previstos com balanços terminais de 3 m e se apóiam em pórticos de pilares quadrados, contraventados na direção transversal.

Um viaduto de acesso do lado de Belo Horizonte completa a estrutura e é composto por um vão e dois balanços projetado, ao que parece, posteriormente.

2.3.2 HISTÓRIA INICIAL

Foi realizada em novembro do ano de 2001, pela autora deste trabalho, uma visita objetivando o reconhecimento dos agregados utilizados e para se ter uma idéia do estado de deterioração em que se encontrava a ponte. Uma vista geral da ponte encontra-se na figura 2.11.

Nesta época, o nível exageradamente baixo do reservatório da Hidrelétrica de Furnas, onde deságua o Rio Turvo, deixou à mostra parte da infra-estrutura da ponte, geralmente submersa, sendo evidente a deterioração. A variação do nível do lago é muito grande, chegando a 18 m conforme informado por Furnas. Observou-se claramente que foram usados agregados graúdos constituídos de pedra mineira no concreto estrutural, conforme mostra a figura 2.12 e também as figuras 2.13 a 2.16. Nota-se também a deterioração do concreto nestas fotografias. Ao que parece e segundo informações do Engenheiro Fernando (Furnas Centrais Elétricas), na época da construção da ponte foi instalada uma central de britagem dos agregados nas proximidades da obra. Tal utilização resultou em grande economia para a referida construção. Fragmentos de pedra mineira são encontrados em abundância nas margens do Rio Turvo nestas imediações.

É importante lembrar que a referida ponte foi construída há mais de trinta anos e até o presente momento não teve manutenção suficiente, nem preventiva, nem curativa. Nesta visita, ficaram constatadas diversas anomalias relacionadas ao concreto. O documentário fotográfico apresentado nas páginas seguintes mostra um panorama do quadro patológico instaurado na estrutura da ponte.



Figura 2.11 – Vista da Ponte do Rio Turvo.



Figura 2.12 – Agregado graúdo constituído pela pedra mineira.

As anomalias observadas na ocasião desta visita são representados principalmente por:

- ❑ Concreto segregado, desagregado e com a superfície irregular (figura 2.13);
- ❑ Fissuras verticais em transversinas e horizontais em pilares;
- ❑ Armaduras expostas e armaduras corroídas em pilares; concreto disgregado (figura 2.14 e figura 2.16); Nota-se nestas figuras que foi iniciado reforço de pilares, mas o serviço não foi concluído.
- ❑ Sapatas com fissuras mapeadas e concreto desagregado (figura 2.15).



Figura 2.13 –Pilar e bloco com concreto segregado, desagregado e com a superfície irregular.



Figura. 2.14 – Armaduras expostas e corroídas no pilar P4; concreto disgregado; Início de reforço do pilar.



Fig. 2.15 – Fissuras mapeadas na sapata do Pilar P2 – concreto desagregado e segregado.



Figura 2.16 –.Armaduras expostas e corroídas pilar P4; concreto disgregado.

A observação visual sugeriu que a causa dos problemas, poderia estar relacionada tanto com os agregados, como com a pasta de cimento, mas os erros na execução da estrutura, tais como cobrimento insuficiente das armaduras e deficiência nas formas eram evidentes. Cura inadequada, sobrecargas não previstas e erros na fabricação ou dosagem do concreto (relação água/cimento elevada, por exemplo) aparentaram também sugestivos. A possibilidade de reação álcali-agregado foi admitida nesta visita de reconhecimento devido à ocorrência de fissuras mapeadas e ao ambiente agressivo pela presença constante da água.

O concreto obtido com utilização da pedra mineira pode ter uma durabilidade favorável à sua utilização, considerando que o concreto da ponte ora analisado está em condições prejudiciais à durabilidade por ter a interferência constante da água. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a água se constitui o principal agente de destruição dos materiais. As pequenas moléculas de água são capazes de penetrar em cavidades ou poros extremamente finos, tem habilidade de dissolver mais substâncias do que qualquer outro líquido.

Existem trechos da estrutura de concreto com estado de conservação aparentemente regular. Considerando a idade desta estrutura, a ausência de inspeção e manutenção por longo tempo e ainda a situação desfavorável provocada pela presença da água e pela exagerada variação do nível do lago, pode-se admitir que os agregados têm condições de ser usados em concretos com bom desempenho quanto à durabilidade, desde que o concreto seja melhor executado e tenha o cimento e a dosagem compatíveis com as características do agregado.

2.3.3 ANOMALIAS ENCONTRADAS

Foram executadas vistorias nas áreas emersas e submersas da ponte, pela equipe do Grupo Concremat, que resultaram no mapeamento das anomalias, conforme tabela 2.11 (TIBA, 1998).

As definições da tabela são relacionadas com as ocorrências da ponte em questão.

Tabela 2.11 – Anomalias observadas na Ponte do Rio Turvo. Fonte: TIBA (1998).

Denominação	Definição
Armadura Exposta	Armaduras indevidamente protegidas pelo cobrimento insuficiente, concreto poroso, fissuração do concreto, segregação, desagregação, disgregação do concreto e outros.
Armadura Exposta e Corroída	Armaduras indevidamente protegidas que sofreram o processo de corrosão do aço. Entende-se por corrosão a interação destrutiva do aço com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica.
Cobrimento Insuficiente	Insuficiência da camada de concreto que separa a armadura do meio exterior.
Fissuras	São descontinuidades com aberturas até 0,4mm que ocorrem no concreto, em virtude da sua baixa resistência à tração com causas variadas.
Trincas	São descontinuidades com abertura contínua e superior a 0,4mm, que ocorrem no concreto em virtude da sua baixa resistência à tração, com causas variadas.
Concreto Desagregado	Fenômeno no qual o cimento vai sendo retirado pela ação da água, ficando conseqüentemente os agregados livres da união que lhes proporciona a pasta de cimento. A lixiviação é uma das principais causas da desagregação.
Concreto Disgregado	É caracterizado pelo lascamento ou esfoliação, originados por esforços internos ou externos, superiores às condições de resistência do material. Esse fenômeno decorre principalmente da corrosão das armaduras.
Concreto Segregado	Concreto com concentração heterogênea dos componentes da mistura, resultando em uma massa não uniforme e via de regra, não coesa. Este fenômeno é congênito e decorrente de falhas executivas.
Junta de concretagem	Ocorrência de concreto segregado em junta de concretagem

2.3.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foram extraídos corpos de prova ao longo de toda a ponte, distribuídos desde as sapatas até a laje do tabuleiro, envolvendo trechos emersos e submersos. Imediatamente após a extração, todos os corpos de prova foram transportados para o Laboratório Central da Concremat, em São Paulo, para execução dos ensaios.

Entre as observações preliminares foi possível destacar, segundo TIBA (1998):

- As amostras de concreto retiradas em geral se mostraram sem vazios, o que mostra um adensamento adequado e com distribuição regular dos agregados graúdos, em meio da massa, o que é indicativo de boa homogeneização da mistura.
- Formação de material branco nas bordas em torno dos agregados, o que é sugestivo da existência de reação álcali-agregado.

Entre os diversos ensaios realizados, são apresentados a seguir aqueles relacionados com o presente trabalho de pesquisa.

2.3.4.1 Resistência à compressão axial

Através de ensaios foi possível conhecer a elevada capacidade de resistência à compressão axial, em concretos tendo a pedra mineira como agregado. A tabela 2.12 (TIBA, 1998) mostra resultados destes ensaios, sendo que os corpos de prova foram retirados de áreas emersas, distribuídas por toda a estrutura da ponte.

Tabela 2.12 – Resistência à compressão axial. Fonte: TIBA (1998)

CP Nº	Peça Estrutural	Diâmetro (cm)	Resistência à Compressão (Mpa)
01	Laje tabuleiro entre P7 e torre 1	9,76	46,5
02	Viga entre P1e P2	9,75	44,9
03	Transversina tabuleiro P10	9,77	24,2
04	Viga torre 5	9,74	38,3
05	Viga torre 3	9,71	40,9
06	Pilar torre 4	9,73	49,4
07	Viga torre 1	9,70	29
08	Viga torre 1	9,73	33,6
09	Viga torre 5	9,76	31,1
10	Viga entre P8 e P9	9,75	34,5
11	Laje entre P1 e P2	9,65	37,5
12	Viga torre 4	9,69	50,7
13	Viga entre P8 e P9	9,74	21,8
14	Pilar torre 5	9,75	39,6
16	Viga torre 6	9,73	38,0
18	Viga entre P4 e P5	9,73	27,3
19	Pilar P9	9,76	42,4
20	Pilar torre 6	9,75	48,4
21	Pilar P9	9,73	48,2
22	Viga torre 3	9,74	42,7
23	Pilar torre 2	9,74	32,1
24	Sapata do pilar P1	9,72	32,5
25	Transversina pilar P1	9,70	19,5
26	Viga torre 6	9,74	35,0
27	Pilar torre 2	9,73	40,8
28	Pilar torre 1	9,74	28,7

Pode-se observar pela tabela que a resistência mínima foi de 19,5 MPa, referente a um único resultado e a máxima foi de 50,7 MPa. Calculando-se a média aritmética de todos os resultados chegou-se ao valor de 36,83 MPa, o que mostra ser possível um concreto de resistência satisfatória utilizando-se os agregados de pedra mineira.

2.3.4.2 Análise petrográfica dos agregados

A síntese das características petrográficas dos agregados graúdos de seis corpos de prova retirados de pontos diversos da estrutura, conforme TIBA (1998), são apresentados nas tabelas 2.13 e 2.14.

Tabela 2.13 – Características gerais do agregado graúdo. Fonte: TIBA (1998).

Características		Amostra
Tipo		Rocha britada
Cor		Branca a acinzentada
Forma		Tendendo a alongada
Grau de arredondamento		Anguloso
Dimensão (intervalo de variação)		0,5 cm a 7,0 cm
Caracterização físico-mecânica	Friabilidade	Não friável
	Compacidade	Compacto
	Tenacidade (resistência à quebra)	Elevada

Tabela 2.14 - Síntese das características petrográficas dos agregados. Fonte: TIBA (1998).

Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica (muscovita/sericita)
	Reativa/ deletéria	Quartzo cisalhado, fino e com extinção ondulante.
Estrutura		Anisótropa, orientada.
Textura		Definida por grãos com contornos recortados e contatos imbricados, fortemente alinhados, em função de um processo de cisalhamento.
Granulação		Fina a média
Alteração		Incipiente
Deformação do agregado		Muito deformado, com deformação visível através da extinção ondulante do quartzo e estiramento dos minerais em decorrência de cisalhamento.
Bordas de reação		São esporadicamente observadas em torno dos agregados graúdos
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Quartzito micáceo a quartzo xisto cataclástico
Reatividade potencial		Agregado reativo

2.3.4.3 Avaliação da durabilidade

Além da análise petrográfica, foram realizadas avaliações do comportamento dos agregados coletados na estrutura através do método acelerado ASTM C 1260 e do método ASTM C 856/83 (Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete). Entre as conclusões obtidas pelo Grupo Concremat (TIBA, 1988) estão as apresentadas a seguir:

- Foram observadas ao microscópio, em algumas amostras, feições sugestivas da reação álcali-agregado, na forma de material branco preenchendo

parcialmente os poros do concreto. Os estudos comprovaram a existência de RAA, do tipo álcali-silicato, cuja expansão causou fissuração no concreto.

- ❑ Os valores obtidos nos ensaios à compressão simples foram superiores ao estabelecido para o concreto da estrutura, o que mostra que a reação álcali-agregado não afetou a resistência deste concreto,
- ❑ “Se considerarmos que um dos fatores que favorece a reação é a presença de umidade na estrutura, esta esteve garantida ao longo de sua vida útil em função do nível do reservatório, o que pressupõe que as reações já consumiram a quantidade de reagente disponível”.
- ❑ Considerando-se o acompanhamento que vem sendo desenvolvido por Furnas Centrais Elétricas S.A. na barragem de Furnas, construída na mesma época, “as taxas de expansão do concreto estão em decréscimo contínuo”.
- ❑ A RAA necessita de espaço físico, “ocupando espaços de fissuras, descontinuidades, juntas de concretagem, etc., sendo favorecida nos locais onde não existe tensão confinante. Esta última explica a grande quantidade de fissuras em alguns blocos de fundação executados com concreto ciclópico não armados e a presença pouco significativa de fissuras onde o concreto esteve bem adensado”.

Com relação a esta última conclusão, pode-se acrescentar que as fissuras causadas por RAA aconteceram quando as tensões produzidas pela expansão foram superiores à resistência do concreto à tração.

PAULON (1981) em seus estudos mostrou explicação para o fato de se ter sapatas que não foram atingidas pela RAA, correspondentes aos pilares mais profundos, que estão constantemente submersas. O conteúdo dos álcalis é reduzido

por difusão e lixiviação, diminuindo a magnitude da reação alcalina, minimizando-se a expansão.

2.3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo de caso apresentado neste trabalho mostrou que o concreto confeccionado com a pedra mineira pode ser um produto de excelente qualidade, competitivo e seguro, desde que o emprego, a escolha do aglomerante e a dosagem deste concreto sejam previamente estudados, no sentido de se evitar patologias como as desenvolvidas na ponte do Rio Turvo. É importante se destacar a existência de trechos da estrutura que permanecem “sadios”, sem ocorrência de RAA, mesmo em ambiente desfavorável como o da ponte, e também os resultados satisfatórios de resistência à compressão dos corpos de prova extraídos.

Conforme já comentado, as falhas ocorridas no processo executivo da estrutura constituíram uma das causas do estado de deterioração em que se encontra a mesma. Como exemplo tem-se o deficiente cobrimento das armaduras e falhas relacionadas à fabricação, lançamento ou cura do concreto dando origem à segregação e à desagregação observadas. Contribuiu ainda para o estado de comprometimento estrutural em que se encontra a ponte, a redução da seção resistente de pilares e vigas, armaduras expostas e corroídas e o quadro de fissuração.

A ampla pesquisa realizada pelo Grupo Concremat confirmou que as falhas executivas estão incluídas nas causas das patologias.

Do conjunto de observações realizadas pelo Grupo e relatadas por TIBA (1998), destacou-se o seguinte:

- “A superfície rugosa e levemente segregada observada na região de variação do nível d’água é o resultado da lixiviação dos componentes do cimento pela fraca ação agressiva da água devido à pureza, como foi verificado na análise química. Este efeito é somente superficial, fato comprovado nos ensaios de ultra-som e nos corpos de prova retirados, devendo-se mesmo assim, aplicar uma proteção superficial localizada”.

- As análises e ensaios realizados através de ultra-som, teor de cimento, absorção e determinação da resistência à compressão indicam que o concreto utilizado durante a obra manteve suas características, com ligeiras variações. A resistência à compressão obtida nos ensaios com corpos de prova retirados da estrutura supera a tensão $\sigma_r = 170\text{kgf/cm}^2$ fixada para o projeto.

- A corrosão das armaduras trata-se de problema localizado, provocados pela falta de cobrimento, não sendo detectado o íon Cl^- no concreto.

- As trincas e fissuras observadas em blocos de fundação e em regiões de pilares (e vigas) são provocadas pelos produtos expansivos geralmente da RAA. “A falta de confinamento nos blocos não armados favorece a formação de fissuras, fato acentuado naqueles da extremidade da ponte, onde as reações são favorecidas pela temperatura. Nos pilares, a presença de armaduras que imprimem restrições, aliadas à compacidade, inibe a desagregação química da massa. Em regiões segregadas as reações expansivas encontram ambiente propício para seu desenvolvimento”.

Até o presente momento, foram realizadas algumas intervenções isoladas na ponte, mas o problema ainda não foi totalmente resolvido. A ponte continua com restrição ao tráfego, sendo indicada a carga máxima de 20 toneladas para veículos que atravessam a ponte.

3. METODOLOGIA

3.1 DIRETRIZES METODOLÓGICAS

A pesquisa consistiu de avaliação tecnológica de concretos, obtidos com utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado graúdo e também como agregado miúdo. As dosagens dos referidos concretos e os tipos de cimento empregados foram definidos objetivando-se a trabalhabilidade, a máxima resistência para cada composição e também a durabilidade.

Foram estudados quatro grupos de concretos, definidos de acordo com os agregados empregados:

- ❑ **Concretos do grupo A:** concretos fabricados com agregado graúdo constituído pelo resíduo britado e separado por peneiras, adicionado ao agregado miúdo, constituído de areia grossa de leito de rio;
- ❑ **Concretos do grupo B:** concretos fabricados com a totalidade dos agregados miúdo e graúdo constituídos pelo resíduo, britados e separados por peneiras;

- **Concreto C:** concreto fabricado com a técnica do agregado graúdo pré-colocado, semelhante a um concreto ciclópico, tal como é usado na região das jazidas, sendo os agregados graúdos constituídos pelos resíduos britados e “assentados” com argamassa de cimento e areia grossa.
- **Concretos do grupo D:** concreto fabricado com agregados convencionais, ou seja, areia grossa de rio e britas comercializadas na cidade de Passos, objetivando-se uma comparação entre as resistências mecânicas desses dois grupos de concreto.

A pesquisa foi realizada em duas etapas a seguir identificadas:

A primeira etapa foi constituída pela fabricação de concretos do grupo A e determinação da resistência à compressão, objetivando-se uma pré-análise experimental do material pesquisado como constituinte do concreto. A intenção foi de se aperfeiçoar as dosagens para a segunda etapa, procurando-se chegar a relações água/cimento as menores possíveis, mantendo-se o abatimento de tronco de cone de acordo com os limites aceitáveis para a trabalhabilidade, ou seja, entre 50 mm e 100 mm. Nesta primeira etapa foi também fabricado e ensaiado o concreto C.

A segunda etapa foi constituída pela fabricação de concretos dos grupos A, B e D, após estudo das dosagens, e pelos ensaios de determinação das propriedades mecânicas dos referidos concretos.

A determinação das propriedades físicas dos agregados foi feita nas duas etapas.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 CIMENTOS

Nos concretos do grupo A e concreto C, da primeira etapa da pesquisa, foi utilizado o **cimento Portland composto CII-F-32**. Durante a realização destes primeiros ensaios foram também realizadas pesquisas bibliográficas e de campo, que mostraram um fato novo: quartzitos da região foram qualificados como potencialmente reativos a álcalis. Diante desse fato, embasando-se na literatura sobre o assunto, os concretos dos grupos A, B e D referentes à segunda etapa de ensaios, tiveram como aglomerante o **cimento Portland de alto forno CIII-32 – RS**, por ser este cimento considerado eficiente na prevenção dos efeitos deletérios da RAA.

O cimento portland composto CII-F-32 usado nesta pesquisa tem composição que se enquadra nos limites da Norma NBR 11578, citada por KATTAR & ALMEIDA (1997). O cimento Portland de alto forno CIII-32 – RS tem composição que se enquadra nos limites da Norma NBR 5736, citada por KATTAR & ALMEIDA (1997). Estes limites são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição em % de massa dos Cimentos Compostos e de Alto Forno –

Fonte: KATTAR & ALMEIDA, 1997.

TIPO DE CIMENTO PORTLAND	SIGLA	CLÍNQUER + GESSO	Escória granulada de alto forno SIGLA E	Material Pozolânico SIGLA Z	Material Carbonático SIGLA F	Norma Brasileira
COMPOSTO	CP II-F	94 – 90	- x -	-x-	6 – 10	NBR 11578
ALTO FORNO	CP III	65 – 25	35 – 70	-x-	0 – 5	NBR 5735

A utilização do cimento Portland de alto forno CP-III-32 - RS, que contem até 70% de escória granulada de alto forno, confere as seguintes características ao concreto:

- Coloração bem mais clara que o concreto convencional. Considerando que os agregados têm a cor branca, foi esperada uma tonalidade de efeito estético favorável, principalmente para o concreto B, onde foi usado apenas o resíduo como agregado.
- Redução da permeabilidade e conseqüente melhora na durabilidade considerando ocorrência de reações químicas. A presença da escória determina uma microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, reduzindo a penetração de água e de elementos agressivos para o interior do concreto. MARQUES & TANGO (1994) confirmaram em suas pesquisas que adição de escória em concretos provocou significativa redução na permeabilidade e aumento da resistência destes concretos.

O complemento “RS” (resistente ao sulfato) não seria necessário, mas foi utilizado este cimento porque era o único CP-III-32 disponível no mercado de Passos, onde foram moldados os corpos de prova.

3.2.2 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo, principal objeto desta pesquisa, foi constituído pelos resíduos da exploração do quartzito (pedra mineira). Foi obtido nos locais de extração e corte da referida pedra e britado manualmente. Os agregados foram caracterizados de acordo com ensaios de absorção, massa específica, massa unitária e composição granulométrica.

Além deste agregado graúdo, foi utilizado agregado graúdo convencional, constituído de britas 2 e 3, produzido pela Empresa Britadora Cantieri e usado freqüentemente na região de Passos, sendo estes agregados constituídos da rocha Gnaisse.

3.2.2.1 Amostragem da pedra mineira

Os resíduos foram recolhidas nas jazidas e em diversas fábricas, em datas diferentes, para que se tivesse uma melhor representatividade do material. Em seguida, foram transportados para o laboratório da Faculdade de Engenharia de Passos, onde foi feita a transformação do material.

3.2.2.2 Transformação do material

O material foi transformado através de britagem manual, com utilização de soquete e martelo de aço e depois separado por peneiras. A operação de britagem consistiu na fragmentação das partículas menores com martelo de aço e das maiores com soquete também de aço, e foi realizada por servente de pedreiro, obtendo-se os seguintes tamanhos de agregados:

Brita 1 ➔ 9,5 mm - 19,0 mm

Brita 2 ➔ 19,0 mm - 25,0 mm

Brita 3 → 25,0 mm - 38,0 mm

A figura 3.1 mostra os agregados constituídos de brita 2 na respectiva peneira. Estas britas foram utilizadas nos concretos dos grupos A e B, adicionadas ao cimento CP-II-F-32, na primeira etapa dos ensaios, conforme dosagens iniciais e adicionadas ao cimento CP-III-32, conforme dosagens definitivas, na segunda etapa dos ensaios.

O material passante na peneira com abertura de malha quadrada de 9,5 mm, composto de agregados graúdos e miúdos misturados, foi chamado “pedrisco” e usado nos concretos do grupo B, adicionado também ao cimento CP-III-32.



Figura 3.1 – Agregado constituído de brita 2 na respectiva peneira.

3.2.3 AGREGADO MIÚDO

Foi utilizada a areia grossa de leito de rio, também chamada de areia lavada, obtida nas proximidades da cidade de Passos, para a produção dos concretos dos grupos A e D e também para o concreto C. No Concreto A o agregado graúdo foi o resíduo da pedra mineira fragmentado.

Para os concretos do grupo B, conforme já informado neste trabalho, foi utilizado o pedrisco, representado pelo material passante na peneira de 9,5 mm de abertura, com agregado miúdo e graúdo misturados.

A granulometria e o módulo de finura dos agregados miúdos utilizados foram determinados conforme Norma Brasileira NBR 7217/87.

3.2.4 ÁGUA

A água de amassamento e também a água de cura utilizadas no concreto são águas potáveis da cidade de Passos/MG. Conforme PETRUCCI (1978) a água que serve para beber é apropriada para a confecção dos concretos, podendo-se concluir que a água a ser utilizada na pesquisa, sendo água potável, é de qualidade apropriada para amassamento e para cura do concreto.

3.2.5 ADITIVO

Foi utilizado aditivo plastificante intermediário Tec – Mult 406, da marca Rheotec, em todos os concretos do grupo B e também nos concretos do grupo A, para

os traços contendo 100% de brita 1. A finalidade foi reduzir a quantidade de água de amassamento mantendo-se a trabalhabilidade entre limites definidos nesta pesquisa. O consumo foi de 6 ml por kg de cimento, conforme instruções do fabricante.

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram realizados ensaios para determinação das características físicas dos agregados e para determinação das seguintes propriedades do concreto:

- ❑ Resistência à compressão;
- ❑ Resistência à tração por compressão diametral;
- ❑ Módulo de deformação

Para avaliação da trabalhabilidade foram efetuadas para todos os concretos dos grupos A, B e D as determinações das consistências pelo abatimento do tronco de cone, conforme Norma brasileira NBR 7223/1992. A figura 3.2 mostra um ensaio realizado para concreto do grupo A.

A idade dos corpos de prova, na ocasião da ruptura, foi sempre 28 dias, para todos os ensaios desta pesquisa, destinados a determinação da resistência mecânica ou módulo de deformação.



Figura 3.2 – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone.

3.3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

Os ensaios de determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos e também os módulos de finura foram realizados, conforme a Norma NBR 7217, de agosto de 1987. Os resultados destes ensaios de composição granulométrica e módulo de finura de agregados encontram-se no Anexo A.

Foram também realizados ensaios, conforme normas brasileiras, para determinação das seguintes propriedades dos agregados, obtidos pela fragmentação do quartzito:

- ❑ Massa unitária, conforme NBR 7810/83 e NBR 7251/82;
- ❑ Massa específica, conforme NBR 9776/87;
- ❑ Absorção de água, conforme NBR 9937/87.

Os resultados destes ensaios são apresentados no Anexo B.

3.3.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

O concreto foi produzido com utilização de betoneira de gravidade. Para o concreto feito de acordo com a dosagem inicial, ou seja, na primeira etapa dos ensaios, a seqüência de colocação dos materiais foi a seguinte:

- ❑ Agregado graúdo;
- ❑ Agregado miúdo e colocação da betoneira em movimento;
- ❑ Cimento;
- ❑ Água de amassamento.

Para as dosagens definitivas, ou seja, para a segunda etapa dos ensaios, uma sugestão feita por BAUER (1979) e também por RIPPER (1995) foi adotada, ficando as seqüências de colocação dos materiais na betoneira as seguintes:

Concretos do grupo A sem aditivo:

- ❑ Água de amassamento;
- ❑ Agregado graúdo e colocação da betoneira em movimento;
- ❑ Cimento;
- ❑ Agregado miúdo.

Concretos do grupo A com aditivo:

- ❑ 80% da água de amassamento;
- ❑ Agregado graúdo e colocação da betoneira em movimento;

- ❑ Cimento;
- ❑ 50% do agregado miúdo
- ❑ 20% da água de amassamento contendo o aditivo diluído
- ❑ 50% do agregado miúdo.

Concreto B:

- ❑ 80% da água de amassamento;
- ❑ Agregado graúdo mais 50% do agregado miúdo (pedrisco) e colocação da betoneira em movimento;
- ❑ Cimento;
- ❑ 20% da água de amassamento contendo o aditivo diluído;
- ❑ 50% do agregado miúdo.

O tempo de mistura ficou entre 3 e 4 minutos, seguindo-se recomendações de RIPPER (1995). É necessário verificar visualmente se a massa do concreto, na saída da caçamba, está suficientemente homogeneizada, o que foi feito durante os ensaios.

3.3.3 MOLDAGEM E CURA DE CORPOS DE PROVA

3.3.3.1 Corpos de prova cilíndricos e cúbicos – Concretos dos grupos A, B e D.

A moldagem e cura de todos os corpos de prova cilíndricos foi realizada em conformidade com a Norma Brasileira NBR 5738/84. A determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone foi feita de acordo com a NBR 7223/92, para todos os concretos fabricados, com exceção do concreto C.

Antes de iniciar a moldagem as fôrmas foram vedadas nas juntas com uma mistura de cera mais óleo mineral e lubrificadas com óleo mineral.

O processo de adensamento adotado foi o manual. Seguindo as instruções da Norma NBR 5738/84, para os corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 150 mm, o concreto foi colocado no molde em quatro camadas, com alturas aproximadamente iguais e aplicados 30 golpes de socamento, uniformemente distribuídos em toda a seção do molde. Nos corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm o concreto foi colocado em duas camadas e aplicados 13 golpes de socamento. Segundo a NBR 5738/84 devem ser aplicados 17 golpes de socamento para cada 10.000 mm².

É importante destacar que o abatimento de tronco de cone deve ser maior que 20 mm, para que o adensamento manual seja aceito pela Norma.

Os corpos de prova cúbicos foram moldados para se ter uma quantidade maior de resultados, sendo o ensaio de compressão para este formato mais simples que aquele feito para o formato cilíndrico, pois não é necessário o capeamento dos corpos de prova. Para os corpos de prova cúbicos o concreto foi colocado em duas camadas e aplicados 18 golpes de socamento uniformemente distribuídos na seção do molde, adaptando-se a recomendação da Norma NBR 5738/84, que determina a aplicação de 8 golpes para cada 10.000 mm² de área de corpo de prova prismático.

A cura inicial foi ao ar. Após a moldagem os corpos de prova foram imediatamente cobertos com lona plástica, para evitar a perda de água do concreto.

Os corpos de prova cilíndricos permanecem nas fôrmas por 24 horas. Após a desforma, os corpos de prova da primeira etapa dos ensaios foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram até a data do ensaio. Os corpos de prova da segunda etapa foram curados imersos em água saturada de cal até o momento do ensaio, conforme figura 3.3.

Os corpos de prova cúbicos permaneceram nas fôrmas por 24 horas e foram curados imersos em água saturada de cal até o momento do ensaio.



Figura 3.3 – Corpos de prova imersos em água durante a cura.

3.3.3.2 Concreto C - Corpos de prova cúbicos com agregados pré-colocados

Foi usado molde metálico com todas as dimensões iguais a 150 mm. Os corpos de prova foram constituídos de camadas de argamassa com 5 mm de espessura aproximadamente e de camadas de agregado graúdo de aproximadamente 25 mm de espessura, conforme esquema mostrado na figura 3.4.

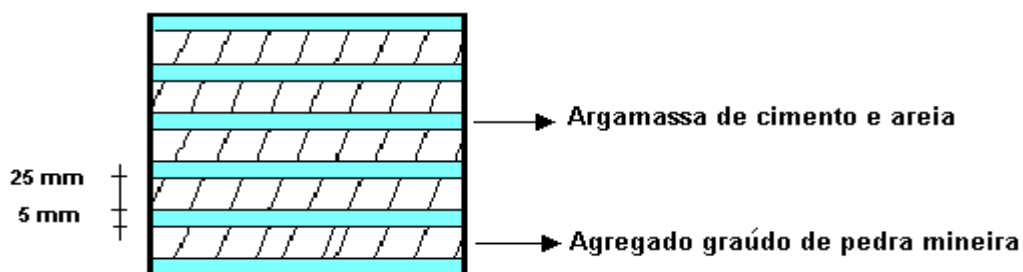


Figura 3.4 – Esquema dos corpos de prova cúbico com agregados pré-colocados.

A argamassa foi feita com o cimento CII-F-32 e areia grossa de rio, utilizando-se traço 1:3 e relação água/cimento de 0,5.

A cura foi feita de maneira idêntica à cura dos corpos de prova cilíndricos da primeira etapa.

3.3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio para determinação da resistência à compressão foi feito utilizando-se máquina de compressão com capacidade de 125 tf, para corpos de prova cilíndricos, com as seguintes dimensões, em conformidade com a Norma NBR 5739/94:

- 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura;
- 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Antes do ensaio os corpos de prova cilíndricos foram capeados com uma mistura a quente de enxofre e materiais granulosos que desenvolvem, na ocasião do ensaio, resistência à compressão superior à resistência prevista para o corpo de prova. A espessura do capeamento não foi superior a 3 mm.

Os corpos de prova já capeados foram colocados sobre o prato inferior da prensa rigorosamente centrados em relação ao eixo de carregamento (figura 3.5).

Foram também ensaiados à compressão todos os corpos de prova cúbicos, sendo todas as dimensões dos mesmos iguais a 15 cm.

As resistências foram obtidas dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção de cada corpo de prova, sendo a unidade de tensão o megapascal (MPa).



Figura 3.5 – Concreto A - Ensaio de compressão no momento da ruptura.

3.3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio foi realizado em conformidade com a Norma NBR 7222/94. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, de dimensões 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura, e também com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Todos foram moldados de acordo com a Norma NBR 5738/84, conforme relatado.

Segundo a NBR 7222/94, o contato entre o corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio deve ser somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas do corpo de prova. É admitida a adaptação de dispositivos complementares às máquinas cujos pratos apresentem o diâmetro ou a maior dimensão inferior à altura do corpo de prova. A carga foi aplicada continuamente, sem choques, com crescimento constante da tensão de tração. Alguns corpos de prova ensaiados à tração encontram-se na figura 3.6.



Figura 3.6 – Cilindros ensaiados à tração e cubos ensaiados à compressão.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela expressão:

$$f = 2 \cdot F / \pi \cdot d \cdot L \quad (3)$$

Onde:

f: resistência à tração por compressão diametral (N/mm²);

F: carga máxima obtida no ensaio (N);

d: diâmetro do corpo de prova (mm);

L: altura do corpo de prova (mm).

3.3.6 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Construção Civil da UNICAMP (LECC), em conformidade com Norma Brasileira 8522/1984. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com dimensões 100 mm de diâmetro por 200 mm de comprimento e também com 150 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento. Foi determinado o módulo de deformação longitudinal secante, sob carregamento estático, à compressão axial simples. Foi adotado o plano de cargas III da citada Norma, aplicando-se um carregamento crescente à velocidade de (0,50 + ou – 0,05) MPa/s, efetuando-se pausas de 60 segundos a cada acréscimo de tensão, após o que foram obtidas as correspondentes leituras médias de deformações. O carregamento foi prosseguido na mesma velocidade até a ruptura.

Foram ensaiados três corpos de prova de cada traço escolhido para a determinação do módulo de deformação, sendo o total de doze corpos de prova.

Para medição das deformações longitudinais foram usadas duas bases de medição, fixadas ao longo de geratrizes igualmente espaçadas no perímetro da seção transversal do corpo de prova, representadas por extensômetros elétricos com sensibilidade de 0,01 mm, mostrados nas figuras 3.7 e 3.8. Esses extensômetros foram ligados a um aquisidor de dados, acoplado a um microcomputador, conforme figura 3.9.

O módulo de deformação secante foi calculado segundo a expressão proposta pela NBR 8522/84:

$$E_{SEC, n} = \sigma_n - \sigma_{inf} / \varepsilon_n - \varepsilon_0 \quad (4)$$

Onde:

$E_{SEC, n}$ = módulo de deformação secante correspondente à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão-deformação relativos às tensões σ_{inf} , igual a 0,5 MPa e σ_n .

σ_n = tensão considerada para o cálculo do módulo secante;

ε_n = deformação específica correspondente à tensão σ_n ;

ε_0 = deformação correspondente à tensão de 0,5 MPa;

$n = 0,1 \dots 0,7$ ou $0,8$ ($\times \sigma_{rup}$).

Neste trabalho foi adotada a tensão σ_n igual a 40% de σ_{rup} .



Figura 3.7 – Extensômetros elétricos fixados no corpo de prova

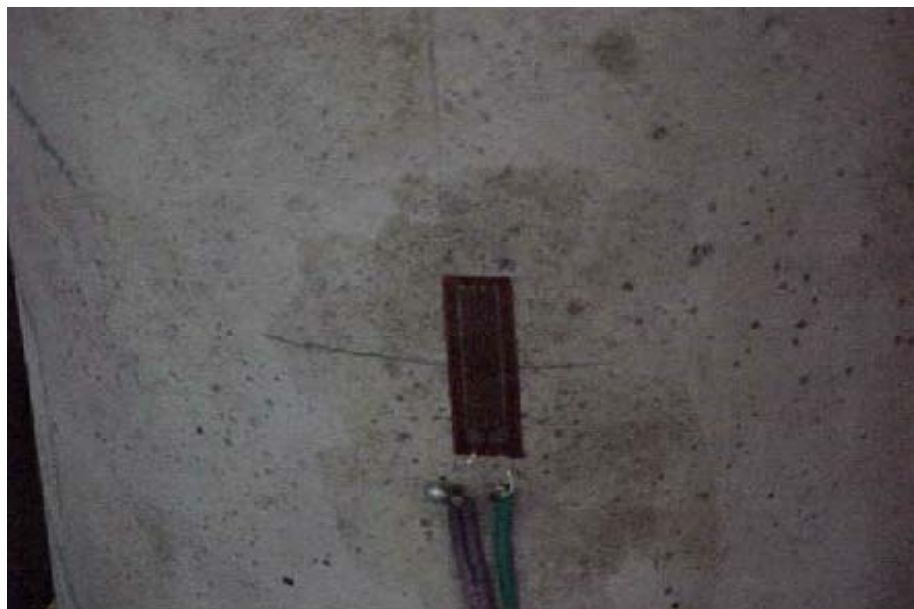


Figura 3.8— Aproximação da figura anterior – detalhe do extensômetro.



Figura 3.9 – Aquisidor de dados acoplado ao microcomputador e conectado ao corpo de prova.

3.3.7 DOSAGENS PARA OS CONCRETOS DO GRUPO A E CONCRETO C - PRIMEIRA ETAPA

Inicialmente foram moldados corpos de prova cilíndricos, para determinação da propriedade mecânica resistência à compressão, utilizando-se os traços usados freqüentemente em concretos convencionais e definidos conforme tabelas 3.2 a 3.4. Para cada um dos doze traços foram moldados, de acordo com a NBR 5738/84, 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 15 cm por 30 cm, resultando no total de 36 corpos de prova.

Conforme já relatado, esta primeira etapa de ensaios foi feita para obtenção de resultados de consistência e resistência à compressão que fornecessem subsídios para melhoria das dosagens da segunda etapa, procurando-se chegar a relações água/cimento as menores possíveis, e a abatimentos de tronco de cone de acordo com limites aceitáveis para a trabalhabilidade, ou seja, entre 50 e 100 mm.

Tabela 3.2 – Traços referentes aos concretos do grupo A utilizando 100% de brita 1-

Concreto	Proporção Cimento/agregado em massa (kg /k g)	H%	Relação água/cimento	Proporção cimento/ areia/ britas 1:a:p
T1	1 : 4	10%	0,5	1: 1,5: 2,5
T2	1 : 5	10%	0,6	1: 2: 3
T3	1 : 6	10%	0,7	1: 2,5: 3,5
T4	1 : 7	10%	0,8	1: 3: 4

Notas:

H: relação entre a água porcentagem de água e os materiais secos, expressa em porcentagem.

1:a:p: proporção cimento/ areia/ brita em massa.

Inicialmente foi usada a relação entre a água e os materiais secos de 10% e relações água/cimento de 0,5 a 0,8 por serem estes valores representativos dos concretos da região produtora de resíduos de pedra mineira. É claro que, foram feitas tentativas de redução destes valores, com a intenção de se obter concretos com maior resistência para um mesmo consumo de cimento.

Tabela 3.3 – Traços referentes aos concretos do grupo A utilizando 50% de brita 1 + 50% de brita 2

Concreto	Proporção Cimento/agregado em massa (kg / kg)	H%	Relação água/cimento	Proporção cimento/ areia/ britas 1:a:p₁: p₂
T5	1 : 4	9,00%	0,45	1: 1,50 : 1,25 : 1,25
T6	1 : 5	9,16%	0,55	1 : 2,00 : 1,50 : 1,50
T7	1 : 6	9,28%	0,65	1 : 2,50 : 1,75 : 1,75
T8	1 : 7	9,37%	0,75	1 : 3,00 : 2,00 : 2,00

Nota: 1: a: p₁:p₂ : proporção cimento, areia, brita 1, brita 2 em massa.

Tabela 3.4 – Traços para concretos do grupo A utilizando 30% de brita 1 + 30% de brita 2 + 40% de brita 3

Concreto	Proporção Cimento/agregado em massa (kg / kg)	H%	Relação água/cimento	Proporção Cimento/ areia/ britas 1: a: p₁: p₂: p₃
T9	1 : 4,0	10,0%	0,5	1: 1,50 : 0,75 : 0,75 : 1,0
T10	1 : 4,4	9,25%	0,5	1: 2,00 : 0,60 : 0,60 : 1,2
T11	1 : 5,0	8,33%	0,5	1: 2,50 : 1,05 : 1,05 : 1,40
T12	1 : 6,0	8,57%	0,6	1 : 3,00 : 1,20 : 1,20 : 1,60

Notas:

1: a: $p_1:p_2:p_3$: proporção cimento, areia, brita 1, brita 2, brita 3 em massa.

No traço T10 da tabela 3.4 a proporção entre as britas foi de 50% de brita 3, 25% de brita 2 e 25% de brita 1.

Foram moldados também 6 corpos de prova cúbicos, com aresta de 150 mm, colocando-se os agregados graúdos em camadas e assentados com argamassa de dosagem conforme tabela 3.5. O agregado miúdo foi o mesmo usado para o concreto A, ou seja, areia lavada de rio.

Tabela 3.5 – Traço para argamassa utilizada no concreto C

Concreto	Proporção Cimento/agregado em massa (kg / kg)	H%	Relação água/cimento
T13	1 : 3	12,5	0,5

Durante e após a realização de todas as etapas dos ensaios, ou seja, moldagem, desforma, cura e ensaio de compressão dos corpos de prova fabricados conforme dosagens iniciais, foram analisados diversos aspectos com a intenção de se obter uma dosagem mais eficiente, ou seja, que proporcione um concreto mais econômico e trabalhável. A consistência pelo abatimento de tronco de cone, o aspecto dos corpos de prova, quanto à quantidade de argamassa em relação ao agregado graúdo e existência de falhas de concreto foram analisados, para subsidiar alterações nas relações água/cimento e nas proporções entre agregados graúdo e miúdos para as dosagens da segunda etapa de ensaios.

3.3.8 DOSAGENS PARA OS CONCRETOS DO GRUPO B – SEGUNDA ETAPA

Os concretos do grupo B foram fabricados utilizando-se como agregado apenas os resíduos da pedra mineira, aproveitando-se o material passante na peneira de 9,5 mm (pedrisco). A intenção foi estudar possibilidades de destino para esse material, que sempre será formado por ocasião da britagem da pedra mineira. A grande quantidade de finos, observada através da curva granulométrica, exigiu relação água/cimento mais elevada, necessária para a trabalhabilidade ao concreto.

Foram moldados, para cada concreto do grupo B, 9 corpos de prova, conforme tabela 3.6, resultando no total de 27 corpos de prova. Estes concretos foram constituídos de brita 2 e pedrisco (material passante na peneira de 9,5 mm), conforme dosagens mostradas na tabela 3.7. Foi incluído aditivo plastificante em todos os traços, objetivando melhor trabalhabilidade.

Tabela 3.6 – Corpos de prova para os concretos do grupo B

PROPRIEDADE MECÂNICA	CORPOS DE PROVA CONCRETO B
Resistência à compressão	3 cubos: 150 x 150 x 150 mm
Resistência à tração por compressão diametral	3 cilindros: diâmetro = 100 mm comprimento = 200mm
Resistência à compressão	3 cilindros: diâmetro = 100 mm comprimento = 200mm

Tabela 3.7 – Traços para os concretos do grupo B

Concreto	Proporção Cim./agreg. em massa (kg / kg)	Relação Água/ cimento	H%	Traço em massa			Aditivo ml/ kg de cim.	% pedrisco.
				Cim.	pedrisco	Brita 2		
T14	1 : 3,0	0,48	12,00	1	2,1	0,9	60	70%
T15	1 : 4,5	0,62	11,27	1	3,2	1,35	60	70%
T16	1 : 6,0	0,84	12,00	1	6,0	0	60	100%

3.3.9 DOSAGENS PARA CONCRETOS DO GRUPO A – SEGUNDA ETAPA

Estas dosagens foram definidas após a realização dos ensaios da primeira etapa, conforme dosagens iniciais para concretos do grupo A, objetivando minimizar ocorrências não recomendáveis. A relação água/cimento foi aumentada ou mantida, considerando-se que muitos resultados do abatimento de tronco de cone foram menores que o recomendável.

Foi observado também que muitos corpos de prova apresentaram falhas de concretagem, causando redução da seção transversal e a impossibilidade de utilização do corpo de prova no ensaio de compressão. Para reduzir essas falhas foi aumentada a relação água cimento e aumentada a proporção de areia com relação à de brita.

Ainda objetivando uma melhor resistência sem prejuízos para a trabalhabilidade, foi incluído um aditivo plastificante nos traços fabricados com 100% de brita 1.

Outro fato observado que levou à alteração nas dosagens foi o ocorrido na britagem manual das pedras. A quantidade formada de britas 2 e 3, conforme definido em 3.3.2.2 e de acordo com o trabalho do operário, foi sempre bem maior que a quantidade de brita 1. Assim, as proporções entre as britas foram alteradas de tal maneira a consumir mais britas 2.

Foram misturados mais doze traços para concretos do grupo A, e moldados, para cada traço, 3 cubos e 6 cilindros, resultando assim 36 cubos e 72 cilindros, no total de 108 corpos de prova.

As tabelas 3.8 a 3.10 mostram os traços utilizados para o Concreto A na segunda etapa dos ensaios. Nestes traços a proporção entre os materiais secos foi sempre a seguinte:

- **Cimento + Areia: 58%**
- **Britas: 42%**

Tabela 3.8 – Traços para concretos do grupo A utilizando 100% de brita 1

Concreto	Proporção cimento/ agregado (kg/ kg)	Relação água/cim.	H %	Traço em massa			Aditivo ml/kg de cimento
				Cim.	Areia	Brita 1	
T17	1 : 3,0	0,40	10	1,00	1,32	1,68	60
T18	1 : 4,5	0,55	10	1,00	2,19	2,31	60
T19	1 : 6,0	0,70	10	1,00	3,06	2,94	60
T20	1 : 7,5	0,85	10	1,00	3,93	3,57	60

Tabela 3.9 – Traços para concretos do grupo A utilizando 30% de brita 1 + 70% de brita 2

Concreto	Proporção cimento/ agregado (kg/ kg)	Relação água/cim.	H %	Traço em massa			
				Cimento	Areia	Brita 1	Brita 2
T21	1 : 3,0	0,40	10	1,00	1,32	0,50	1,18
T22	1 : 4,5	0,55	10	1,00	2,19	0,69	1,62
T23	1 : 6,0	0,70	10	1,00	3,06	0,88	2,06
T24	1 : 7,5	0,85	10	1,00	3,93	1,07	2,50

Tabela 3.10– Traços para concretos do grupo A utilizando 30% de brita 1 + 30% de brita 2 + 40% de brita 3

Concreto	Proporção cimento/ Agregado (kg/ kg)	Relação água/cimento	H %	Traço em massa				
				Cimento	Areia	Brita 1	Brita 2	Brita 3
T25	1 : 3,0	0,40	10	1,00	1,32	0,50	0,50	0,67
T26	1 : 4,5	0,55	10	1,00	2,19	0,69	0,69	0,92
T27	1 : 6,0	0,70	10	1,00	3,06	0,88	0,88	1,18
T28	1 : 7,5	0,85	10	1,00	3,93	1,07	1,07	1,43

A tabela 3.11 mostra as dimensões dos corpos de prova moldados para cada traço e os ensaios a que foram submetidos.

Tabela 3.11 – Corpos de prova para os concretos do grupo A – segunda etapa

PROPRIEDADE MECÂNICA	Concretos T17 e T20	Concretos T18 e T19	Concretos T21, T24, T25, T26, T27, T28	Concretos T22 e T23
Resistência à compressão	3 cubos 150 x 150 mm	3 cubos 150 x 150 mm	3 cubos 150 x 150 mm	3 cubos 150 x 150 mm
Resistência à compressão	3 cilindros 100 x 200 mm	-	3 cilindros 150 x 300 mm	-
Resistência à tração por compressão diametral	3 cilindros 100 x 200 mm	3 cilindros 100 x 200 mm	3 cilindros 150 x 300 mm	3 cilindros 150 x 300 mm
Módulo de deformação e resistência à compressão	-	3 cilindros 100 x 200 mm	-	3 cilindros 150 x 300 mm

A determinação da consistência através do abatimento de tronco de cone foi feita, conforme já relatado, para todas as dosagens desta pesquisa. O resultado deste ensaio deveria ficar entre 50 e 100 mm e preferencialmente entre 70 e 90 mm. Objetivando atender esta condição, foram feitas pequenas adições de água de amassamento nos concretos onde o aditivo plastificante não foi usado. O teor de água em relação aos materiais secos foi então aumentado para no máximo 10,9 %. Essas alterações estão representadas nas tabelas de dosagens do capítulo 4, Resultados.

3.3.10 DOSAGENS PARA OS CONCRETO DO GRUPO D

Conforme já comentado, foram incluídos na pesquisa alguns traços executados com agregados convencionais, objetivando uma avaliação dos agregados pesquisados

em comparação com estes agregados convencionais, através das propriedades mecânicas obtidas por ocasião dos ensaios.

O Concreto D foi fabricado utilizando-se como agregado miúdo o mesmo anteriormente definido para o Concreto A, ou seja, areia grossa de leito de rio, e como agregado graúdo as britas 1 e 2, constituídas da rocha gnaisse, utilizadas em concretos convencionais na região. Observa-se que as partículas desse agregado possuem a forma angulosa e praticamente não existem partículas lamelares. A forma do agregado dos concretos do grupo D é, portanto mais apropriada para concreto do que a forma do agregado de pedra mineira.

As dosagens foram as mesmas usadas para os concreto do grupo A, segunda etapa, com utilização de 30% de brita 1 e 70% de brita 2, conforme tabela 3.12. Foram moldados, para o Concreto D, 36 corpos de prova, conforme tabela 3.13

Tabela 3.12 – Traços para os concretos do grupo D - 70% de brita 2 + 30% de brita 1

Concreto	Proporção cimento/ Agregado (kg/ kg)	Relação água/cimento	H %	Traço em massa			
				Cimento	Areia	Brita 1	Brita 2
T29	1 : 3,0	0,40	10	1,00	1,32	0,50	1,18
T30	1 : 4,5	0,55	10	1,00	2,19	0,69	1,62
T31	1 : 6,0	0,70	10	1,00	3,06	0,88	2,06
T32	1 : 7,5	0,85	10	1,00	3,93	1,07	2,50

Tabela 3.13 – Corpos de prova para os concretos do grupo D

PROPRIEDADE MECÂNICA	Concreto T29, T30, T31	Concreto T32
Resistência à compressão	3 cubos 150 x 150 mm	3 cubos 150 x 150 mm
Resistência à tração por compressão diametral	3 cilindros 150 x 300 mm	3 cilindros 100 x 200 mm
Resistência à compressão	3 cilindros 150 x 300 mm	3 cilindros 150 x 300 mm

2. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios resistência à compressão e resistência à tração dos concretos dos grupos A, B, e D, resistência à compressão do concreto C e também o resultado do módulo de elasticidade de concretos do grupo A.

Todas as propriedades mecânicas desta pesquisa foram determinadas para corpos de prova com a idade de 28 dias.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - PRIMEIRA ETAPA

Estão apresentadas a seguir as tabelas e gráficos que mostram os resultados dos ensaios de compressão, de corpos de prova cilíndricos, moldados com concretos do grupo A e também as dosagens, quantidades utilizadas e resultados do ensaio de consistência, pelo abatimento de tronco de cone. Estes resultados estão nas tabelas 4.1 a 4.3 e nas figuras 4.1 a 4.3.

Em seguida estão os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos, fabricados com concreto C. Estes resultados estão na tabela 4.4.

Tabela 4.1 - Resistência à compressão - concretos do grupo A - primeira etapa

Corpos de prova cilíndricos			
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3
T1	4	0,5	10	1,5	2,5	0	0
T2	5	0,6	10	2,0	3,0	0	0
T3	6	0,7	10	2,5	3,5	0	0
T4	7	0,8	10	3,0	4,0	0	0

Concreto	cimento	água	areia	brita 1	brita 2	brita 3	abatim.
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	cm
T1	9	4,5	13,50	22,50	0	0	5
T2	9	5,4	18,00	27,00	0	0	8
T3	8	5,6	20,00	28,00	0	0	8
T4	4	3,2	12,00	16,00	0	0	0,5

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			Tensão Média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T1	355000	507500	0	17954,6	18030,3	0,0	19,77	28,15	0,00	23,96
T2	380000	297500	270000	18106,1	17954,6	17879,1	20,99	16,57	15,10	17,55
T3	205000	305000	255200	17803,7	18030,3	18030,3	11,51	16,92	14,15	14,19
T4	260000	237500	0	17954,6	17954,6	0,0	14,48	13,23	0,00	13,85

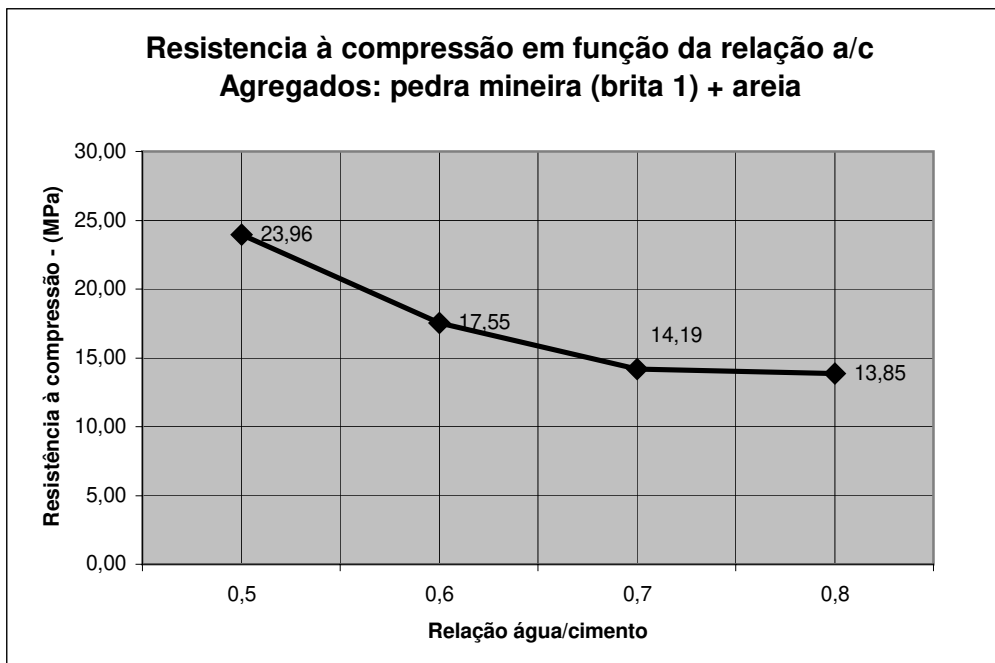


Figura 4.1 – Influência da relação água/cimento sobre a resistência à compressão (1ª etapa)

O gráfico da figura 4.1 mostra que a curva referente à variação da resistência à compressão, em função da relação água/cimento (Curva de Abrams), é semelhante às curvas da maioria dos concretos com agregados convencionais.

Neste trabalho foram definidas as expressões representativas das curvas de Abrams, que têm a seguinte forma geral:

$$f_{c28} = A / B^x \quad (05)$$

Onde:

f_{c28} = resistência à compressão aos vinte e oito dias;

x = relação água/cimento;

A, B = constantes representativas de cada concreto.

Neste trabalho a determinação (matemática) das constantes A e B foi feita conforme PETRUCCI (1978), sendo necessário pelo menos 3 pontos conhecidos da Curva de Abrams. A figura 4.1 mostra a curva de Abrams para os concretos T1 a T4 e pode ser assim representada:

$$f_{c28} = 56,68 / 6,40^x$$

Tabela 4.2 - Resistência à compressão - concretos do grupo A - primeira etapa

Corpos de prova cilíndricos			
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	50%
		BRITA 2:	50%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3
T5	4	0,45	9,00	1,50	1,25	1,25	0,00
T6	5	0,55	9,17	2,00	1,50	1,50	0,00
T7	6	0,65	9,29	2,50	1,75	1,75	0,00
T8	7	0,75	9,38	3,00	2,00	2,00	0,00

Concreto	cimento	água	areia	brita 1	brita 2	brita 3	abatim.
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	cm
T5	8,00	3,60	12,00	10,00	10,00	0,00	3,00
T6	8,00	4,40	16,00	12,00	12,00	0,00	0,00
T7	7,00	4,55	17,50	12,25	12,25	0,00	1,50
T8	7,00	5,25	21,00	14,00	14,00	0,00	1,50

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T5	275000	300000	0	17578,6	17579	0	15,64	17,07	∞	16,36
T6	359000	277000	334000	17653,5	17579	17654	20,34	15,76	18,92	18,34
T7	302500	307500	220000	18106,1	18182	17729	16,71	16,91	12,41	15,34
T8	260000	232500	235000	17954,6	17879	17879	14,48	13,00	13,14	13,54

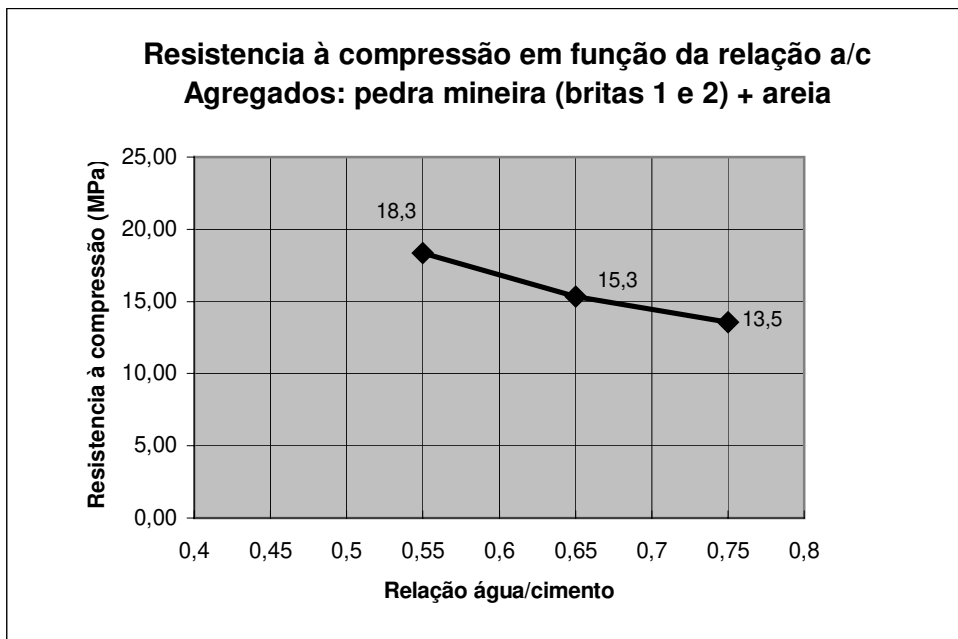


Figura 4.2 –. Influência da relação água/cimento sobre a resistência à compressão (1ª etapa)

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 18,53 / 1,01^x$$

Neste trabalho optou-se por eliminar do gráfico da resistência em função da relação água/cimento os pontos correspondentes à dosagens, para as quais a resistência não se enquadra na curva de Abrams. Dessa forma as equações puderam ser definidas para todos os concretos estudados.

Segundo HELENE & TERZIAN (1993) “a resistência à compressão passa a ser função exclusiva da relação água/cimento, sempre que se tratar de concretos correntes amassados com agregados convencionais e de boa resistência”. Esta situação não é o caso dos concretos fabricados com os agregados de pedra mineira, que possuem resistência inferior aos agregados convencionais (gnaisse e basalto por exemplo). Dessa forma, alterações na curva de Abrams podem estar relacionadas com a resistência do agregado de pedra mineira.

Para o traçado do gráfico da figura 4.2 foi eliminado o ponto correspondente ao concreto fabricado com traço T5, por não se enquadrar na curva de Abrams e por ter apresentado resistência incompatível com os concretos estudados.

Tabela 4.3 - Resistência à compressão - concretos do grupo A - primeira etapa

Corpos de prova cilíndrico			
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	30%
		BRITA 3:	40%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3
T9	4,00	0,50	10,00	1,50	0,75	0,75	1,00
T10	4,40	0,50	9,26	2,00	0,60	0,60	1,20
T11	5,00	0,55	9,17	2,00	0,90	0,90	1,20
T12	6,00	0,60	8,57	2,50	1,05	1,05	1,40

Concreto	cimento kg	água kg	areia kg	brita 1 kg	brita 2 kg	brita 3 kg	abatim. cm
T9	9,00	4,50	13,50	6,75	6,75	9,00	12
T10	7,00	3,50	14,00	4,20	4,20	8,40	5
T11	8,00	4,40	16,00	7,20	7,20	9,60	2
T12	7,00	4,20	17,50	7,35	7,35	9,80	4

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T9	262500	330000	272500	18030,3	17804	17504	14,56	18,54	15,57	16,22
T10	385000	390000	380000	17879,1	17879	18182	21,53	21,81	20,90	21,42
T11	337500	420000	325000	18030,3	18182	17955	18,72	23,10	18,10	19,97
T12	312500	290000	317500	18106,1	17879	18030	17,26	16,22	17,61	17,03

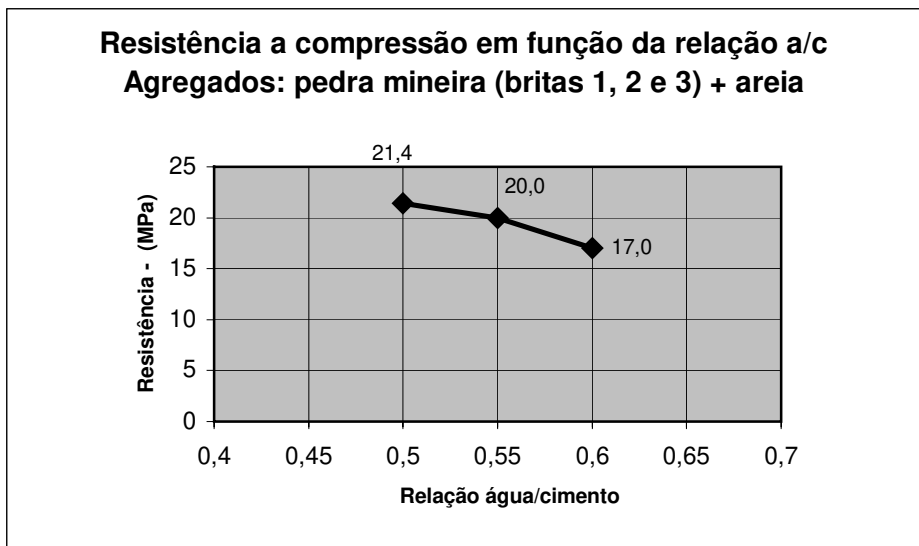


Figura 4.3 –. Influência da relação água/cimento sobre a resistência à compressão (1ª etapa)

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 68,72 / 9,99^x$$

Para o traçado deste gráfico foi eliminado o ponto correspondente ao traço T9, por não se enquadrar na curva de Abrams. Conforme previsto para esta etapa dos ensaios, as dosagens iniciais poderiam ser alteradas durante os ensaios, considerando que o comportamento dos resíduos como agregados era ainda desconhecido. O objetivo desta etapa não foi exatamente determinar as resistências, mas melhorar as dosagens da segunda etapa conforme já relatado.

Os concretos de traços T9 e T10 foram fabricados com a mesma relação água/cimento. No traço T10 a porcentagem de areia + cimento foi aumentada de 50% para 56% e foi observado um aumento de resistência de aproximadamente 15%. DÍAZ (1998) afirma que “os agregados graúdos de forma lamelar requerem uma quantidade de areia muito maior que aquela obtida no método baseado na granulometria ideal e, conseqüentemente, uma maior quantidade de água”.

Tabela 4.4 - Resistência à compressão - Concreto C

CORPOS DE PROVA CÚBICOS				
Concreto: Argamassa + Agregado graúdo:				
1 camada de argamassa (0,5cm)				
1 camada de agregado graúdo				
Agregado graúdo: quartzito residual				

Concreto	1:m	a/c	H %	areia
T13	3	0,5	12,5	3
T13	3	0,5	12,5	3

Concreto	cimento	água	areia
	kg	kg	kg
T13	5	2,5	15
T13	5	2,5	15

RESULTADOS

28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			Tensão Média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T13	257500	322000	248000	22500	22350	22800	11,44	14,41	10,88	12,93
T13	357500	277500	332500	22952	22950	23104	15,58	12,09	14,39	14,02

4.2 DOSAGENS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS NA SEGUNDA ETAPA

As tabelas seguintes (4.5 a 4.10) mostram as dosagens utilizadas em todos os concretos, as quantidades de material e o resultado da consistência, medida pelo abatimento de tronco de cone. Foi também calculado o consumo de cimento, utilizando-se a seguinte expressão:

$$C = 1000 / (1/\gamma_c + a/\gamma_a + p/\gamma_p + X) \quad (06)$$

Onde:

C: consumo de cimento em kg/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento (adotado 3,15 kg/l);

γ_a = massa específica da areia de rio (adotado 2,6 kg/l);

γ_p = massa específica da pedra mineira (adotado 2,7 kg/l);

X = relação água /cimento.

Tabela 4.5 - Dosagem - Concretos do grupo B

Corpos de prova cilíndricos e cúbicos		
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92	
Agregado graúdo:	Quartzito residual =	Pedrisco e brita 2
Agregado miúdo:	Quartzito residual =	Pedrisco
Aditivo: Plastificante		

Concreto	1:m	a/c	H %	pedrisco	brita 1	brita 2	Σ agreg	Aditivo ml/kg cim	% pedrisco
T14	3,0	0,48	12,00	2,10	0,00	0,90	3,00	6,0	70%
T15	4,5	0,62	11,27	3,15	0,00	1,35	4,50	6,0	70%
T16	6,0	0,84	12,00	6,00	0,00	0,00	6,00	6,0	100%

Concreto	cimento kg	água kg	pedrisco kg	brita 2 kg	Total kg	Aditivo g	Abatim. cm	cons. cim. kg/m3
T14	11,0	5,3	23,1	9,9	38,3	66,0	7	523,95
T15	8,0	5,0	25,2	10,8	41,0	48,0	5	384,01
T16	6,0	5,0	36,0	0,0	41,0	36,0	1	295,89

Tabela 4.6 - Dosagem - Concretos do grupo A

Corpos de prova cilíndricos e cúbicos			
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	Σ Agreg.	aditivo ml/kg cim	cons.cim kg/m ³
T17	3,0	0,40	10,0	1,32	1,68	3,0	6	541,31
T18	4,5	0,55	10,0	2,19	2,31	4,5	6	389,81
T19	6,0	0,70	10,0	3,06	2,94	6,0	6	304,57
T20	7,5	0,85	10,0	3,93	3,57	7,5	6	249,92

Concreto	cimento kg	água kg	areia kg	brita 1 kg	Total kg	aditivo ml	abatim. cm
T17	11,0	4,4	14,5	18,5	48,4	66	11
T18	8,0	4,4	17,5	18,5	48,4	48	7
T19	6,5	4,6	19,9	19,1	50,1	39	7
T20	5,4	4,6	21,2	19,3	50,5	32	6

Tabela 4.7 - Dosagem - Concretos do grupo A

Corpos de prova cilíndricos e cúbicos			
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	

Concreto	1:m	a/c efetiva	H % efetivo	areia	brita 1	brita 2	Σ agreg.	a/c prevista.	H % prev.	Cons.cim kg/m ³
T21	3,0	0,43	10,8	1,32	0,50	1,18	3,0	0,40	10,0	532,66
T22	4,5	0,59	10,7	2,19	0,69	1,62	4,5	0,55	10,0	383,83
T23	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	2,06	6,0	0,70	10,0	300,91
T24	7,5	0,88	10,4	3,93	1,07	2,50	7,5	0,85	10,0	248,06

Concreto	cimento kg	água kg	areia kg	brita 1 kg	brita 2 kg	Total kg	abatim. cm
T21	23,5	10,1	31,0	11,8	27,6	104,1	6
T22	17,0	10,0	37,2	11,8	27,5	103,5	6
T23	13,0	9,6	39,8	11,5	26,8	100,6	3
T24	10,4	9,2	40,9	11,1	26,0	97,6	2

Tabela 4.8 - Dosagem - Concretos do grupo A

Corpos de prova cilíndricos e cúbicos			
Normas: NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92			
Agregado graúdo: Quartzito residual		BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	30%
		BRITA 3:	40%
Proporção materiais secos: cimento + areia: 58% britas: 42%			

Concr.	1:m	a/c efetiva	H % efetivo	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Σ agreg	a/c prevista	H % previsto
T25	3,0	0,44	11,0	1,32	0,50	0,50	0,67	3,0	0,40	10,0
T26	4,5	0,60	10,9	2,19	0,69	0,69	0,92	4,5	0,55	10,0
T27	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	0,88	1,18	6,0	0,70	10,0
T28	7,5	0,90	10,6	3,93	1,07	1,07	1,43	7,5	0,85	10,0

Concr.	cimento kg	água kg	areia kg	brita 1 kg	brita 2 kg	brita 3 kg	Total kg	abatim. cm	Cons.cim kg/m3
T25	23,0	10,1	30,4	11,6	11,6	15,5	102,1	10	529,84
T26	17,0	10,2	37,2	11,8	11,8	15,7	103,7	9	382,36
T27	13,5	10,0	41,3	11,9	11,9	15,9	104,5	6	300,91
T28	10,4	9,4	40,9	11,1	11,1	14,9	97,8	3	246,84

Tabela 4.9 - Dosagem - Concretos do grupo D

Corpos de prova cilíndricos e cúbicos			
Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	BRITA 1:		30%
	BRITA 2:		70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%		britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Σ agreg	cons. cim. kg/m ³
T29	3,0	0,40	10,00	1,32	0,50	1,18	3,00	541,31
T30	4,5	0,55	10,00	2,19	0,69	1,62	4,50	389,81
T31	6,0	0,70	10,00	3,06	0,88	2,06	6,00	304,57
T32	7,5	0,85	10,00	3,93	1,07	2,50	7,50	249,92

Concreto	cimento kg	água kg	areia kg	brita 1 kg	brita 2 kg	Total kg	abatim. cm
T29	23,5	9,4	31,0	11,8	27,6	103,4	10
T30	17,0	9,4	37,2	11,8	27,5	102,9	11
T31	13,0	9,1	39,8	11,5	26,8	100,1	5
T32	10,4	8,8	40,9	11,1	26,0	97,2	7

4. 3 RESISTENCIA À COMPRESSÃO – SEGUNDA ETAPA

No cálculo das resistências médias, para os concretos da segunda etapa, foram eliminados os valores das tensões correspondentes às carga sublinhadas, divergentes em mais de 20% do maior valor. Segundo HELENE & TERZIAN (1992), conforme tabela 2.10 deste trabalho, as variações nos resultados da resistência à compressão relacionadas com procedimentos de ensaio podem determinar redução significativa nessas resistências, de até 5% para velocidade de carregamento e até 50% para adensamento inadequado e remate inadequado dos topos. Por outro lado, os possíveis aumento de resistência são de até 5 % para velocidade de carregamento e

de até 10%, para variações no processo de cura, que provavelmente não estaria afetando as divergências verificadas nos ensaios desta pesquisa, pois os corpos de prova foram curados igualmente. Dessa forma, considerando que a Norma Brasileira NBR 5739/94 não determina nenhum procedimento para eliminação de valores extremos, optou-se por desprezar os resultados divergentes em mais de 20% do maior valor, admitindo que esses resultados representam falhas no adensamento ou remate dos topos.

A seguir estão as tabelas de resultados de resistência à compressão aos 28 dias de todos os concretos da segunda etapa, com a seguinte numeração de acordo com o concreto e com os corpos de prova:

- ❑ Tabelas 4.10 a 4.12: Concreto A, cilindros;
- ❑ Tabelas 4.13 a 4.15: Concreto A, cubos;
- ❑ Tabela 4.16: Concreto B, cilindros;
- ❑ Tabela 4.17: Concreto B, cubos;
- ❑ Tabela 4.18: Concreto D, cilindros;
- ❑ Tabela 4.19: Concreto D, Cubos.

As figuras 4.4 a 4.21 representam os gráficos correspondentes às tabelas 4.10 a 4.19 e mostram a resistência à compressão em função da relação água cimento ou em função do consumo de cimento.

Tabela 4.10 - Resistência à compressão - Concretos do grupo A
Corpos de prova cilíndricos 100 x 200 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%		britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³	aditivo ml/kg cim
T17	3,0	0,40	10	1,32	1,68	11	541,31	6
T18	4,5	0,55	10	2,19	2,31	7	389,81	6
T19	6,0	0,70	10	3,06	2,94	7	304,57	6
T20	7,5	0,85	10	3,93	3,57	6	249,92	6

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T17	180000	247500	230000	7896	7946	7946	22,80	31,15	28,94	30,05
T18	204000	202000	217000	7896	7896	7896	25,84	25,58	27,48	26,30
T19	172000	178000	151000	7896	7896	7896	21,78	22,54	19,12	21,15
T20	112500	87500	110000	7896	7896	7946	14,25	11,08	13,84	14,05

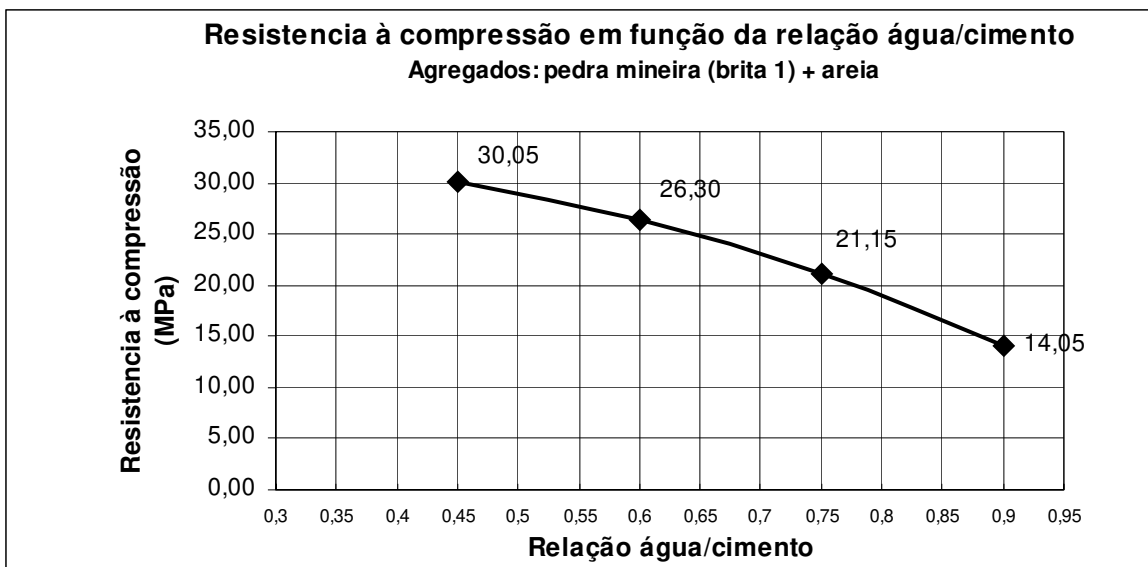


Figura 4.4 - Influência da relação água/cimento sobre a resistência à compressão, concreto com aditivo

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 67,76 / 5,29^x$$

No gráfico da figura 4.4 a curva de Abrams apresenta concavidade “invertida” com relação às curvas de concretos com agregados convencionais. Alterações no formato da Curva de Abrams podem também estar relacionadas com a resistência do agregado de pedra mineira.

Tabela 4.11 - Resistência à compressão - Concretos do grupo A
Corpos de prova cilíndricos 150 x 300 mm

Normas: NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92			
Agregado graúdo: Quartzito residual		BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:		cimento + areia: 58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³
T21	3,0	0,43	10,8	1,32	0,50	1,18	6	532,66
T22	4,5	0,59	10,7	2,19	0,69	1,62	6	383,83
T23	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	2,06	3	300,91
T24	7,5	0,88	10,4	3,93	1,07	2,50	2	248,06

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (Mpa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T21	512500	517500	490000	18335	18335	18182	27,95	28,23	26,95	27,71
T22	383000	405000	383000	17654	18030	17654	21,70	22,46	21,70	21,95
T23	300000	300000	304000	18335	18335	18335	16,36	16,36	16,58	16,44
T24	302500	290000	280000	18335	18335	18335	16,50	15,82	15,27	15,86

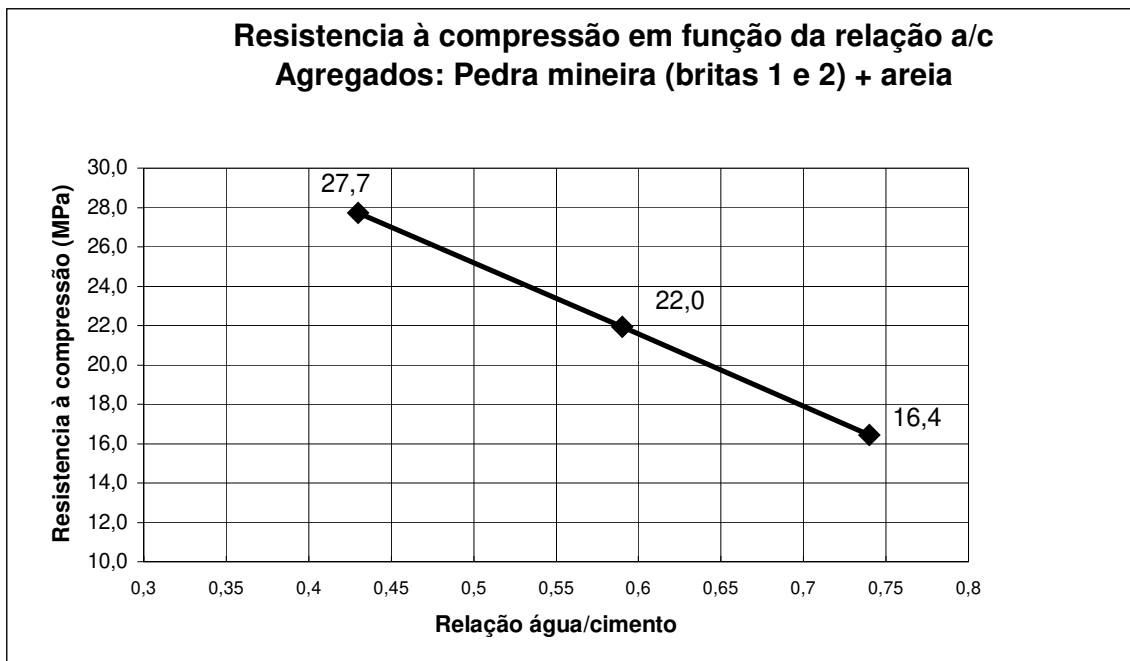


Figura 4.5 - Influência da relação água/cimento sobre a resistência à compressão.

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 56,73 / 5,285^x$$

O concreto T24 apresentou resistência superior ao valor esperado para compor a curva de Abrams, sendo eliminado do gráfico. O valor do abatimento deste concreto foi muito baixo (20 mm) e justifica a resistência não pertencente à curva de Abrams, que é verificada para concretos trabaláveis.

Tabela 4.12 - Resistência à compressão - Concretos do grupo A
Corpos de prova cilíndricos 150 x 300 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	30%
		BRITA 3:	40%
Proporção materiais secos:	cimento + areia:	58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³
T25	3,0	0,44	11,0	1,32	0,50	0,50	0,67	10	529,84
T26	4,5	0,60	10,9	2,19	0,69	0,69	0,92	9	382,36
T27	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	0,88	1,18	6	300,91
T28	7,5	0,90	10,6	3,93	1,07	1,07	1,43	3	246,84

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T25	517500	<u>417500</u>	580000	18411	18335	18565	28,11	22,77	31,24	29,68
T26	407500	402500	<u>210000</u>	18641	18030	18335	21,86	22,32	11,45	22,09
T27	295000	275000	292500	18335	18258	18335	16,09	15,06	15,95	15,70
T28	232500	227500	237500	18335	18335	18335	12,68	12,41	12,95	12,68

A Curva de Abrams relativa ao gráfico da figura 4.6 é a seguinte:

$$f_{c28} = 67,81 / 6,7^x$$

Os gráficos representados nas figuras 4.7 a 4.9 foram traçados para facilitar a comparação entre as resistências obtidas de acordo com o consumo de cimento por metro cúbico, pois este valor tem influência decisiva sobre o custo do concreto.

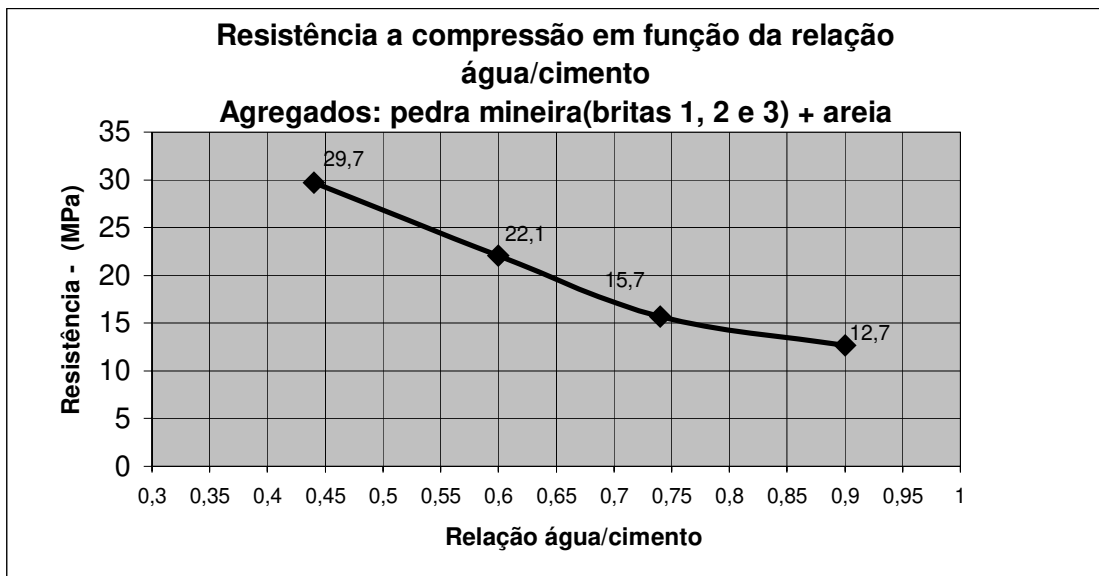


Figura 4.6 Influência da relação água/cimento sobre a resistência à compressão.

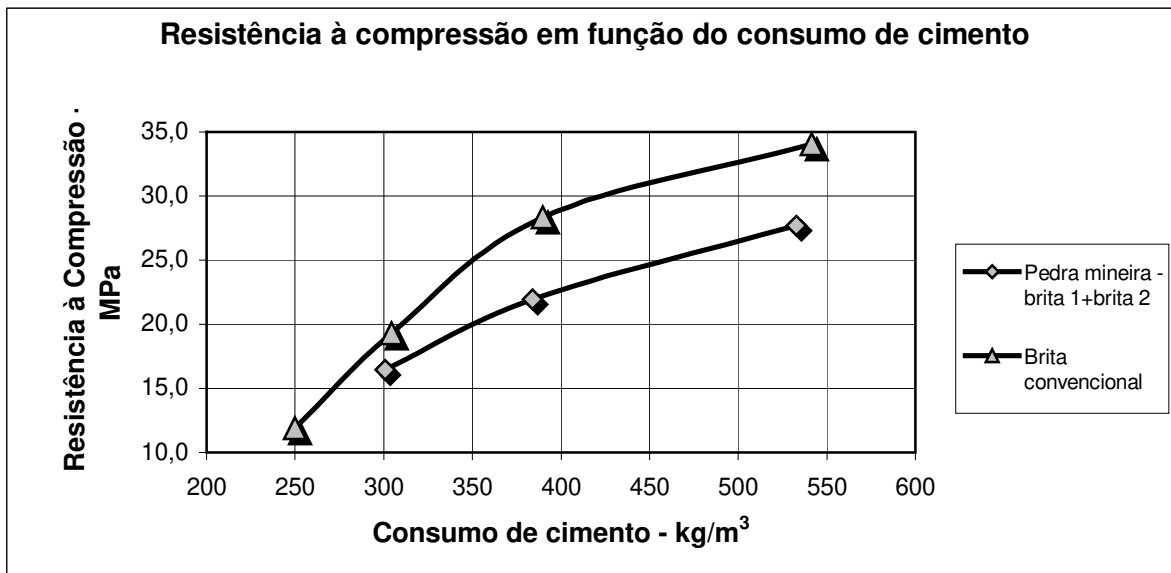


Figura 4.7 Influência do consumo de cimento e do tipo de agregado graúdo sobre a resistência à compressão.

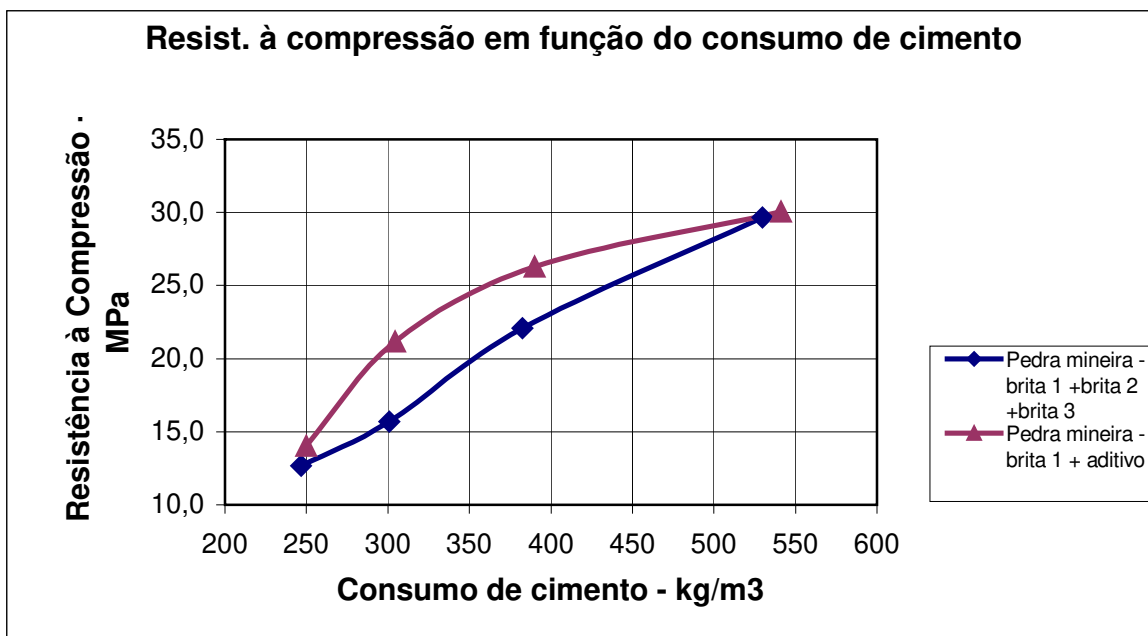


Figura 4.8 - Influência do consumo de cimento e do tamanho das britas sobre a resistência à compressão.

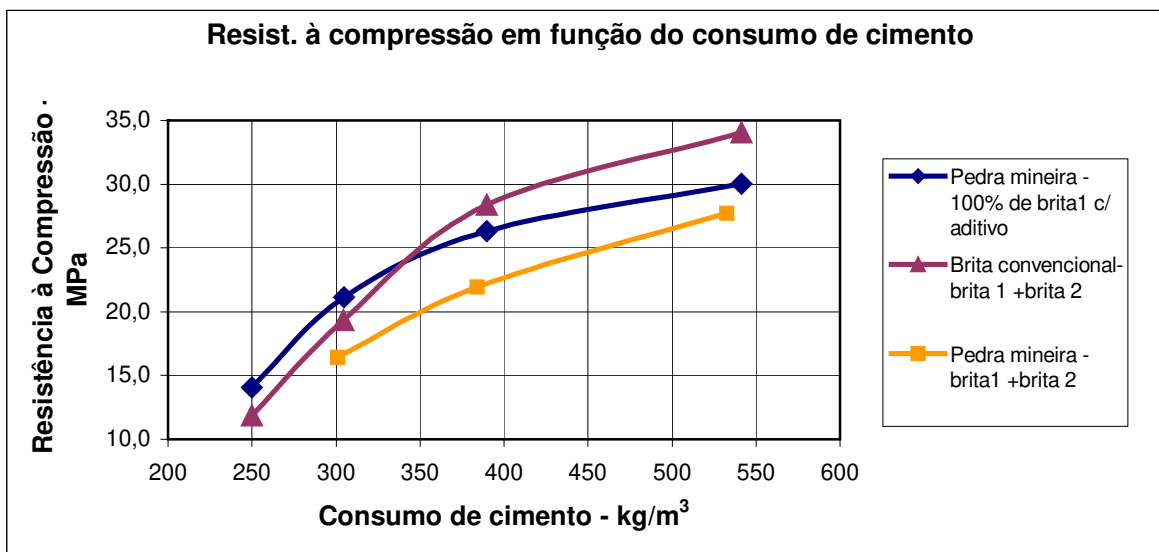


Figura 4.9 – Influência do consumo de cimento, do tipo de agregado e tamanho das britas sobre a resistência à compressão.

Tabela 4.13 - Resistência à compressão - Concretos do grupo A
Corpos de prova cúbicos - aresta: 150 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%
Proporção materiais secos:	cimento + areia:	58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³	aditivo ml/kg cim
T17	3,0	0,40	10	1,32	1,68	11	541,31	6
T18	4,5	0,55	10	2,19	2,31	7	389,81	6
T19	6,0	0,70	10	3,06	2,94	7	304,57	6
T20	7,5	0,85	10	3,93	3,57	6	249,92	6

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas mm ²	TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T17	872500	807500	0	22500	38,78	35,89	0,00	37,33
T18	547500	712500	520000	22500	24,33	31,67	23,11	31,67
T19	507500	462500	560000	22500	22,56	20,56	24,89	23,72
T20	362500	385000	295000	22500	16,11	17,11	13,11	16,61

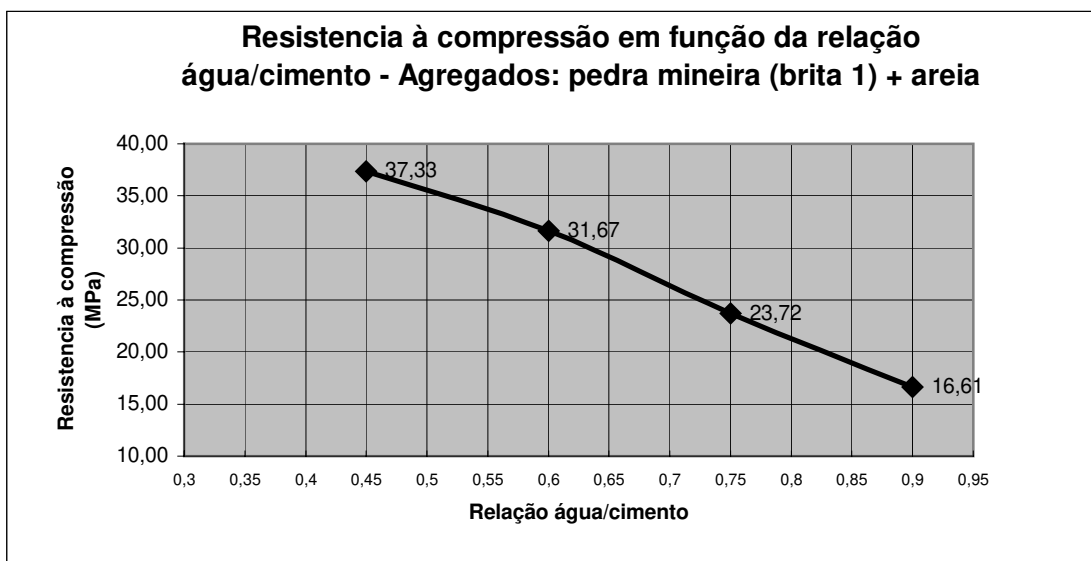


Figura 4.10 – Influência da relação A/C na resistência à compressão, concreto com aditivo, CP cúbicos

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 76,41 / 5,05^x$$

Tabela 4.14 - Resistência à compressão - Concretos do grupo A
Corpos de prova cúbicos - aresta: 150 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³
T21	3,0	0,43	10,8	1,32	0,50	1,18	6	532,66
T22	4,5	0,59	10,7	2,19	0,69	1,62	6	383,83
T23	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	2,06	3	300,91
T24	7,5	0,88	10,4	3,93	1,07	2,50	2	248,06

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas mm ²	TENSÕES (Mpa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T21	<u>582500</u>	820000	0	22500	25,89	36,44	0,00	36,44
T22	632500	645000	625000	22500	28,11	28,67	27,78	28,19
T23	460000	<u>397500</u>	480000	22500	20,44	17,67	21,33	20,89
T24	365000	290000	0	22500	16,22	12,89	x	14,56

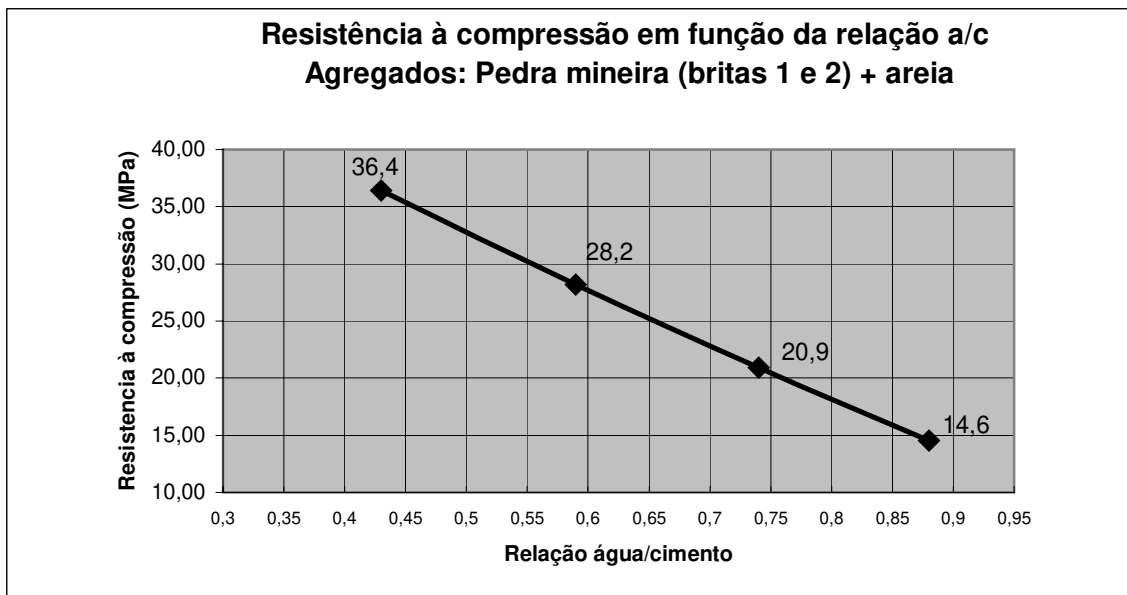


Figura 4.11 - Influência da relação A/C na resistência à compressão, CP cúbico.

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 89,76 / 6,76^x$$

Tabela 4.15 - Resistência à compressão - Concretos do grupo A
Corpos de prova cúbicos - aresta: 150 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	30%
		BRITA 3:	40%
Proporção materiais secos:	cimento + areia:	58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³
T25	3,0	0,44	11,0	1,32	0,50	0,50	0,67	10	529,84
T26	4,5	0,60	10,9	2,19	0,69	0,69	0,92	9	382,36
T27	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	0,88	1,18	6	300,91
T28	7,5	0,90	10,6	3,93	1,07	1,07	1,43	3	246,84

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas mm ²	TENSÕES (Mpa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T25	637500	737500	640000	22500	28,33	32,78	28,44	32,78
T26	612500	610000	600000	22500	27,22	27,11	26,67	27,00
T27	445000	475000	447500	22500	19,78	21,11	19,89	20,26
T28	335000	320000	x	22500	14,89	14,22	x	14,56

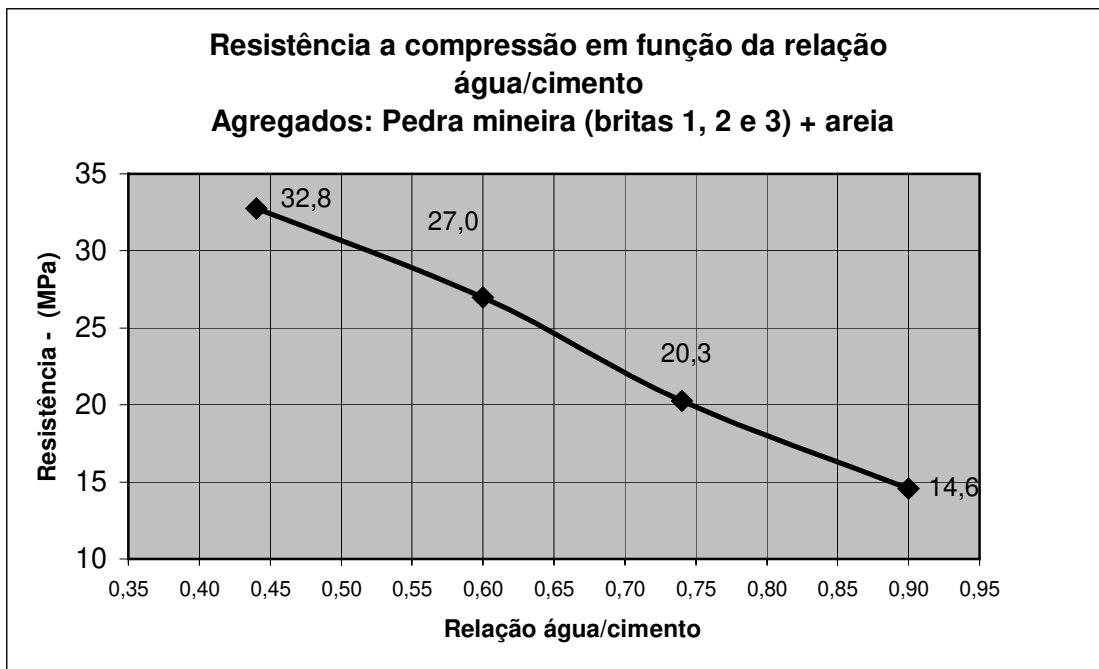


Figura 4.12 - Influência da relação A/C na resistência à compressão, CP cúbico.

Curva de Abrams:

$$f_{c28} = 74,75 / 5,95^x$$

As figuras 4.14 a 4.15 possibilitam uma comparação entre concretos dos grupo A e entre concretos dos grupos A e D, corpos de prova cúbicos.

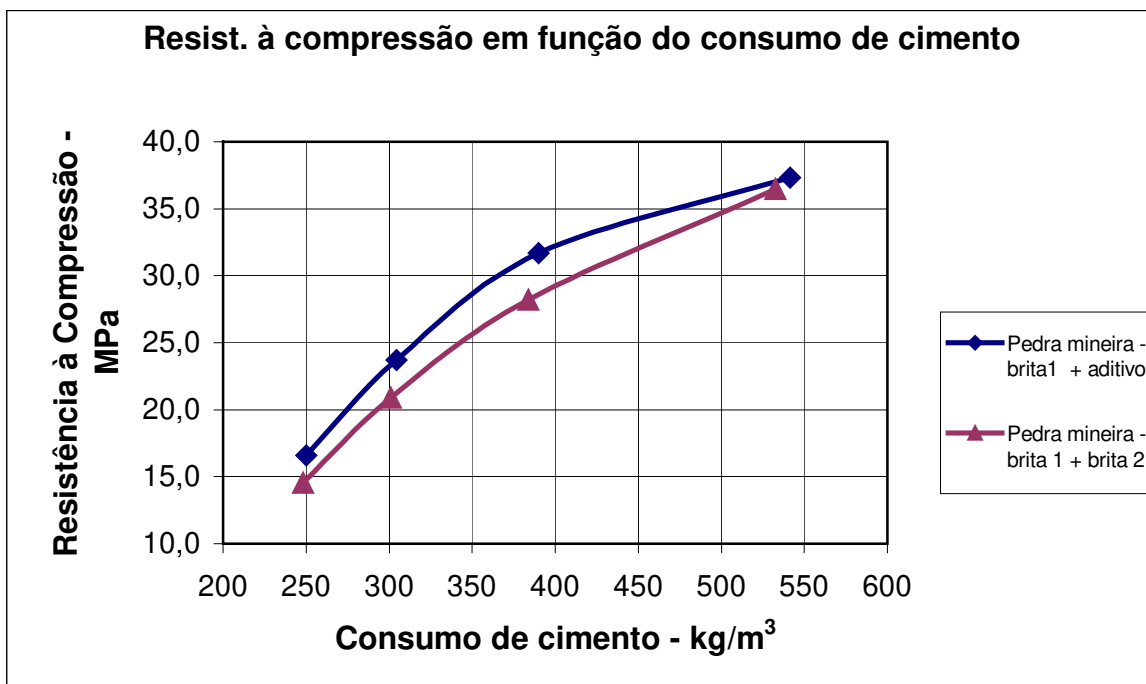


Figura 4.13 – Influência do consumo de cimento e do tamanho das britas na resistência à compressão, CP cúbicos.

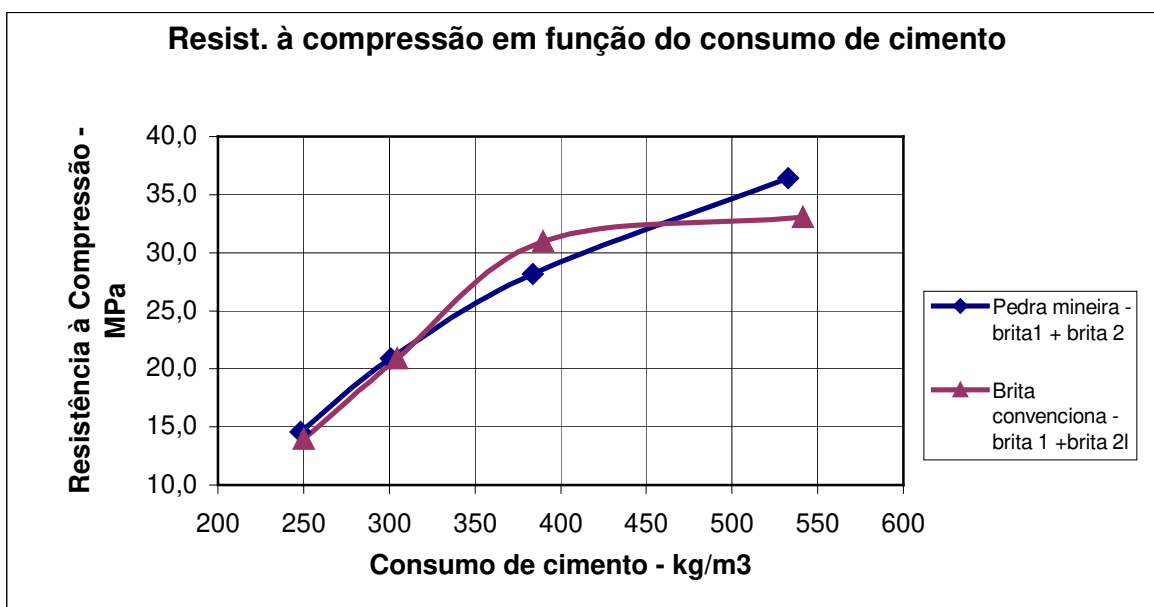


Figura 4.14 – Influência do consumo de cimento e do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão, CP cúbicos.

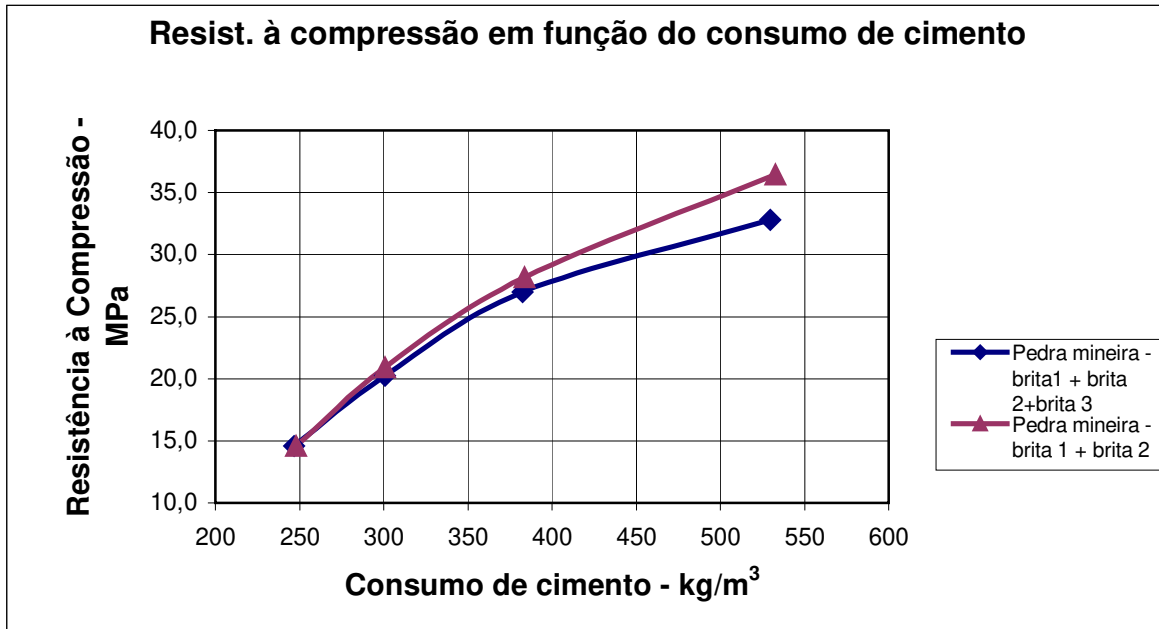


Figura 4.15 – Influência do consumo de cimento e do tamanho das britas na resistência à compressão, CP cúbicos.

Tabela 4.16 - Resistência à compressão - Concretos do grupo B
Corpos de prova cilíndricos - 100 x 200 mm

Normas:		NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92	
Agregado graúdo:	Quartzito residual = Pedrisco e brita 2		
Agregado miúdo:	Quartzito residual = Pedrisco		
Aditivo Plastificante:	6 ml/kg de cimento		

Concreto	1:m	a/c	H %	pedrisco	brita 1	brita 2	Σ agreg	Cons.cim. kg/m³	pedrisco %	Abatim. cm
T14	3,0	0,48	12,00	2,10	0,00	0,90	3,00	523,95	70%	7
T15	4,5	0,62	11,27	3,15	0,00	1,35	4,50	384,01	70%	5
T16	6,0	0,84	12,00	6,00	0,00	0,00	6,00	295,89	100%	1

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm²)			TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T14	215000	242500	270000	7896,056	7846,0	7946,3	27,23	30,91	33,98	32,44
T15	175000	170000	185000	7946,269	7946,3	7946,3	22,02	21,39	23,28	22,23
T16	135000	132500	117500	7946,269	7946,3	7946,3	16,99	16,67	14,79	16,15

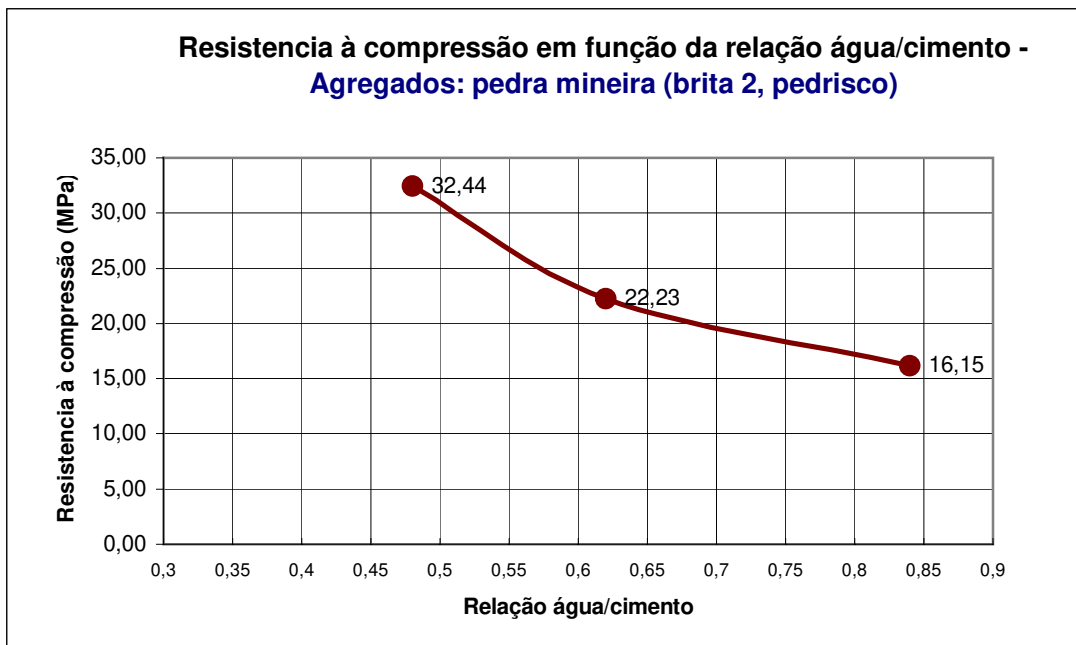


Figura 4.16 - Influência da relação A/C na resistência à compressão, Concreto B, com aditivo.

A figura 4.17 mostra uma comparação entre concretos dos grupos A, B e D. Observa-se que para o maior consumo de cimento o concreto do grupo B alcançou resistência superior à dos concretos do grupo A.

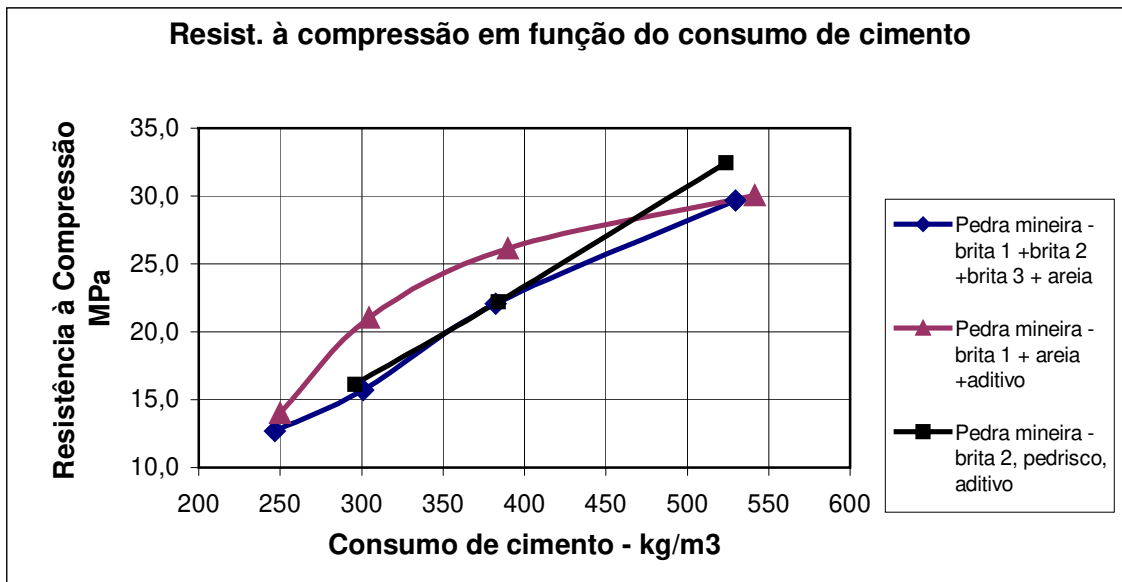


Figura 4.17 – Influência do consumo de cimento e dos agregados na resistência à compressão.

A curva de Abrams referente à figura 4.16 tem a seguinte expressão:

$$f_{c28} = 77,15 / 6,65^x$$

Tabela 4.17 - Resistência à compressão - Concretos do grupo D
Corpos de prova cilíndricos - 150 x 300 mm

Normas: NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92			
Agregado graúdo:	Britas convencionais		BRITA 1: 30%
	Rocha: gnaiss		BRITA 2: 70%
Proporção materiais secos:		cimento + areia: 58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Abatim. cm	Cons.cim. kg/m ³
T29	3,0	0,40	10	1,32	0,50	1,18	10	541,31
T30	4,5	0,55	10	2,19	0,69	1,62	11	389,81
T31	6,0	0,70	10	3,06	0,88	2,06	5	304,57
T32	7,5	0,85	10	3,93	1,07	2,50	7	249,92

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas (mm ²)			TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	T1	T2	T3	
T29	605000	632500	<u>552500</u>	18030,3	18335	17955	33,55	34,50	30,77	34,03
T30	505000	535000	0	18334,6	18335	18335	27,54	29,18	0,00	28,36
T31	345000	357500	360000	18334,6	18335	18335	18,82	19,50	19,64	19,32
T32	205000	212500	225000	18030,3	17729	18335	11,37	11,99	12,27	11,88

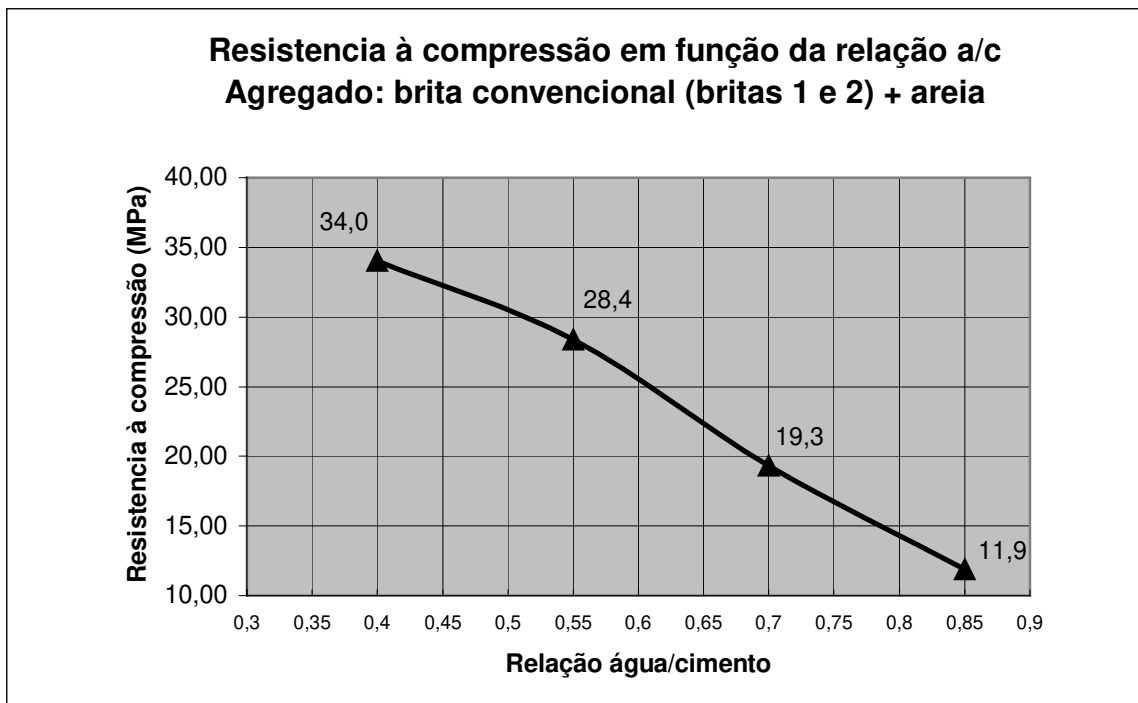


Fig. 4.18 – Influência da relação A/C na resistência à compressão , concreto D.

A curva de Abrams referente à figura 4.18 é:

$$f_{c\ 28} = 94,69 / 10,56^x$$

Tabela 4.18 - Resistência à compressão - Concretos do grupo B
Corpos de prova cúbicos - Aresta = 150 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92
Agregado graúdo:	Quartzito residual = Pedrisco - brita 2
Agregado miúdo:	Quartzito residual = Pedrisco
Aditivo Plastificante:	Consumo de 6 ml/kg de cimento

Concreto	1:m	a/c	H %	pedrisco	brita 1	brita 2	Σ agreg	Cons.cim. kg/m ³	pedrisco %	Abatim. cm
T14	3,0	0,48	12,00	2,10	0,00	0,90	3,00	523,95	70%	7
T15	4,5	0,62	11,27	3,15	0,00	1,35	4,50	384,01	70%	5
T16	6,0	0,84	12,00	6,00	0,00	0,00	6,00	295,89	100%	1

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas mm ²	TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T14	682500	720000	685000	22500	30,33	32,00	30,44	30,93
T15	515000	602500	0	22500	22,89	26,78	0,00	26,78
T16	410000	492500	450000	22500	18,22	21,89	20,00	20,94

A figura 4.19 representa curva de Abrams definida pela expressão:

$$f_{c28} = 52,18 / 2,97^x$$

A figura 4.20 representa uma comparação entre os concretos dos grupos A e B contendo aditivo. As resistências dos concreto do grupo A foram superiores para todos os consumos de cimento.

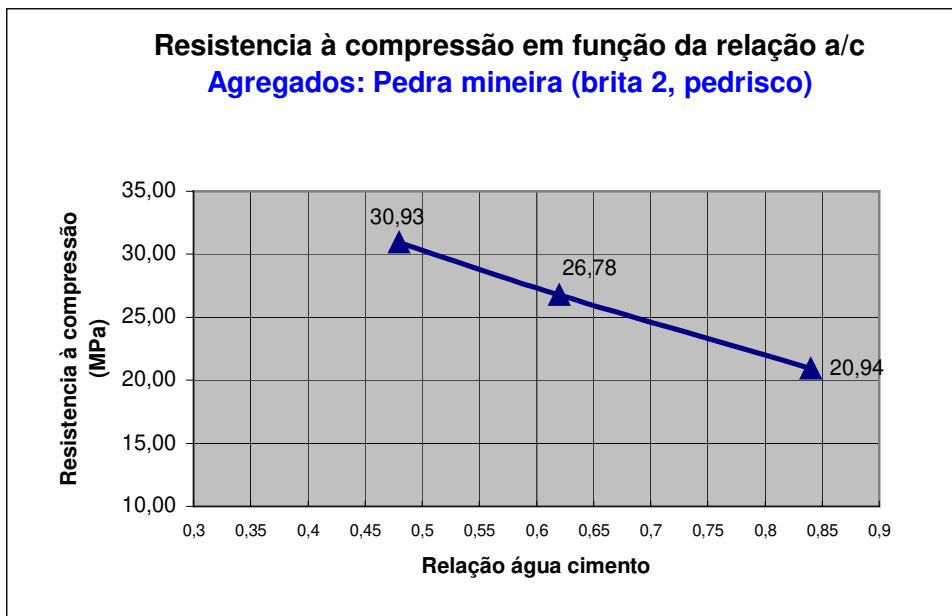


Figura 4.19 – Influência da relação A/C na resistência à compressão, Concreto B, CP cúbicos.

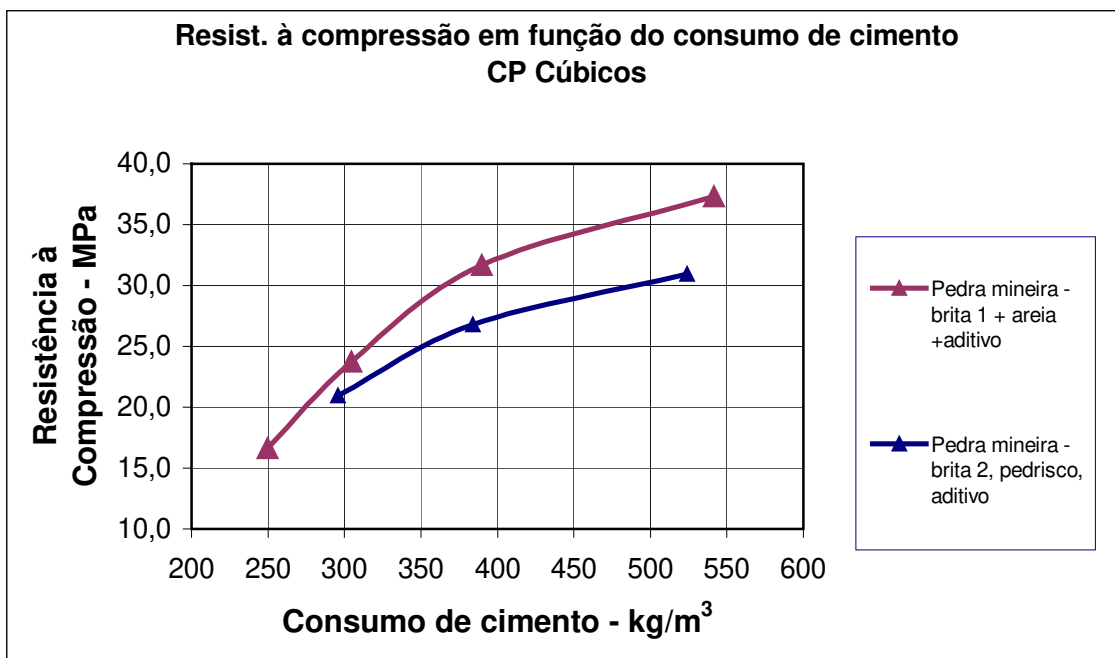


Tabela 4.19 - Resistência à compressão - Concretos do grupo D
Corpos de prova cúbicos - Aresta = 150 mm

Normas: NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7223/92			
Agregado graúdo:	Brita convencional		BRITA 1: 30%
	Rocha: gnaiss		BRITA 2: 70%
Proporção materiais secos:		cimento + areia: 58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Abatim. cm	Cons.cim. kg/m ³
T29	3,0	0,40	10	1,32	0,50	1,18	10	541,31
T30	4,5	0,55	10	2,19	0,69	1,62	11	389,81
T31	6,0	0,70	10	3,06	0,88	2,06	5	304,57
T32	7,5	0,85	10	3,93	1,07	2,50	7	249,92

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Áreas mm ²	TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T29	730000	757500	0	22500	32,44	33,67	0,00	33,06
T30	690000	700000	700000	22500	30,67	31,11	31,11	30,96
T31	460000	397500	480000	22500	20,44	17,67	21,33	20,89
T32	315000	317500	310000	22500	14,00	14,11	13,78	13,96

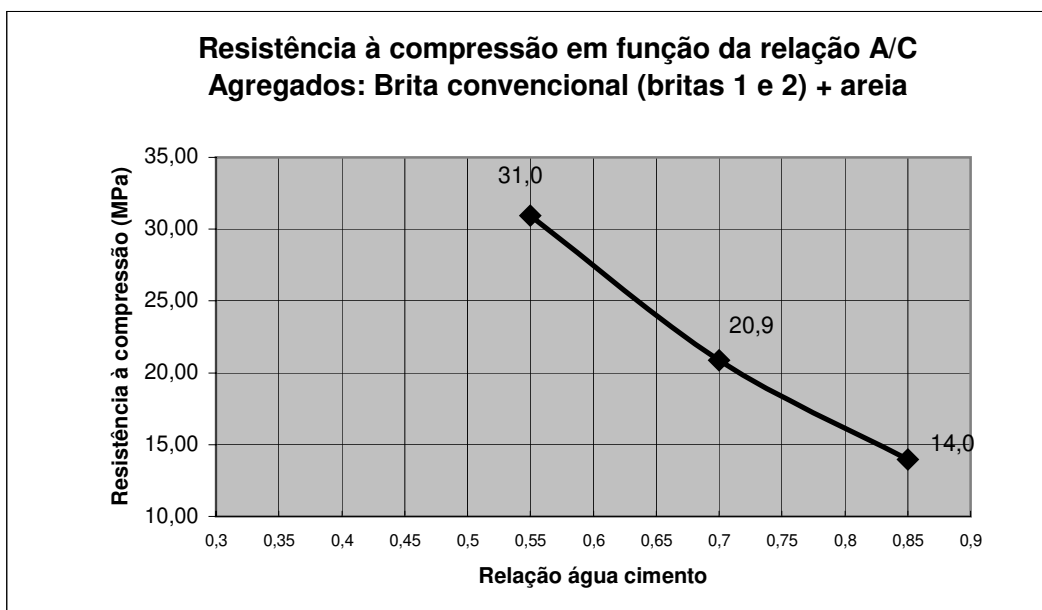


Figura 4.21 – Influência da relação A/C na resistência à compressão, Concreto D, CP cúbicos.

A resistência correspondente ao concreto T28, CP cúbico foi eliminada do gráfico por não pertencer à curva de Abrams da figura 4.21, que pode ser representada pela expressão:

$$F_{c28} = 133,27/14,15^x$$

4.4 RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As tabelas e figuras a seguir mostram o resultado dos ensaios de tração referentes aos concretos dos grupos A, B e D. Todos os ensaios foram realizados aos 28 dias.

Tabela 4.20 - Resistência à tração - Concretos do Grupo A
Corpos de prova cilíndricos - 100 x 200 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7222/94		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%
Proporção materiais secos:	cimento + areia:	58%	britas: 42%
Aditivo Plastificante: consumo de 6 ml/kg de cimento			

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³	aditivo ml/kg cim
T17	3,0	0,40	10	1,32	1,68	11	541,31	6
T18	4,5	0,55	10	2,19	2,31	7	389,81	6
T19	6,0	0,70	10	3,06	2,94	7	304,57	6
T20	7,5	0,85	10	3,93	3,57	6	249,92	6

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Área mm ²	TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T17	132500	112500	125000	62832	4,22	3,58	3,98	3,93
T18	100000	92500	0	62832	3,18	2,94	0,00	3,06
T19	81250	84500	82500	62832	2,59	2,69	2,63	2,40
T20	57500	62500	60000	62832	1,83	1,99	1,91	1,91

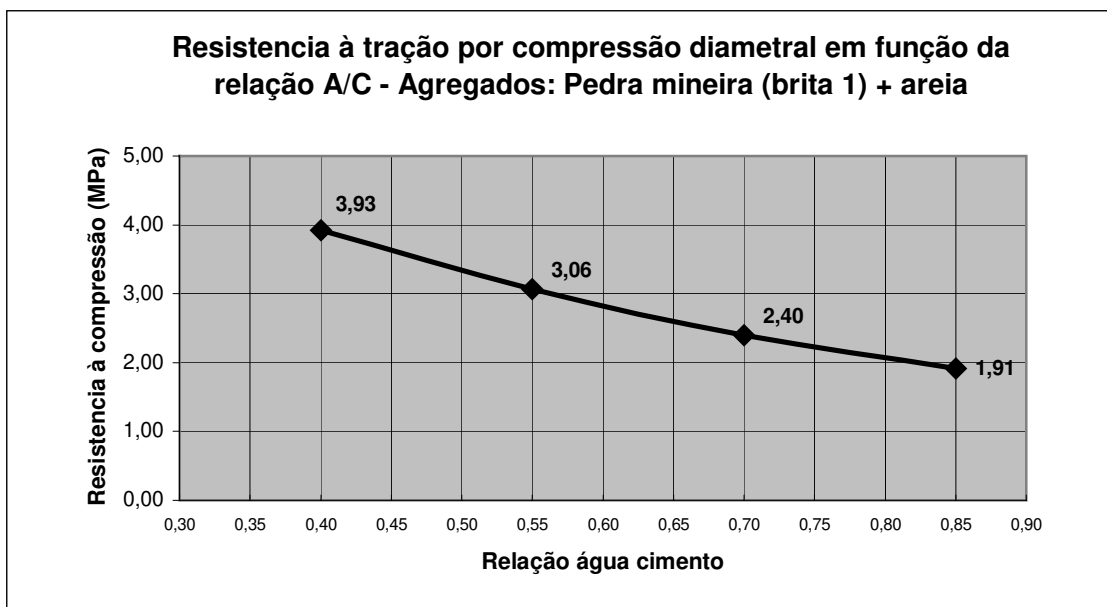


Figura 4.22 – Influência da relação A/C na resistência à tração, concreto A com aditivo.

Tabela 4.21 - Resistência à tração - Concretos do Grupo A
Corpos de prova cilíndricos - 150 x 300 mm

Normas: NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7222/94			
Agregado graúdo: Quartzito residual		BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:		cimento + areia: 58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Abatim. cm	Cons.cim kg/m3
T21	3,0	0,43	10,8	1,32	0,50	1,18	6	532,66
T22	4,5	0,59	10,7	2,19	0,69	1,62	6	383,83
T23	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	2,06	3	300,91
T24	7,5	0,88	10,4	3,93	1,07	2,50	2	248,06

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Área mm2	TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T21	250000	232500	215000	141372	3,54	3,29	3,04	3,29
T22	187500	220000	x	141372	2,65	3,11	x	2,88
T23	170000	157500	170000	141372	2,41	2,23	2,41	2,35
T24	155000	170000	160000	141372	2,19	2,41	2,26	2,29

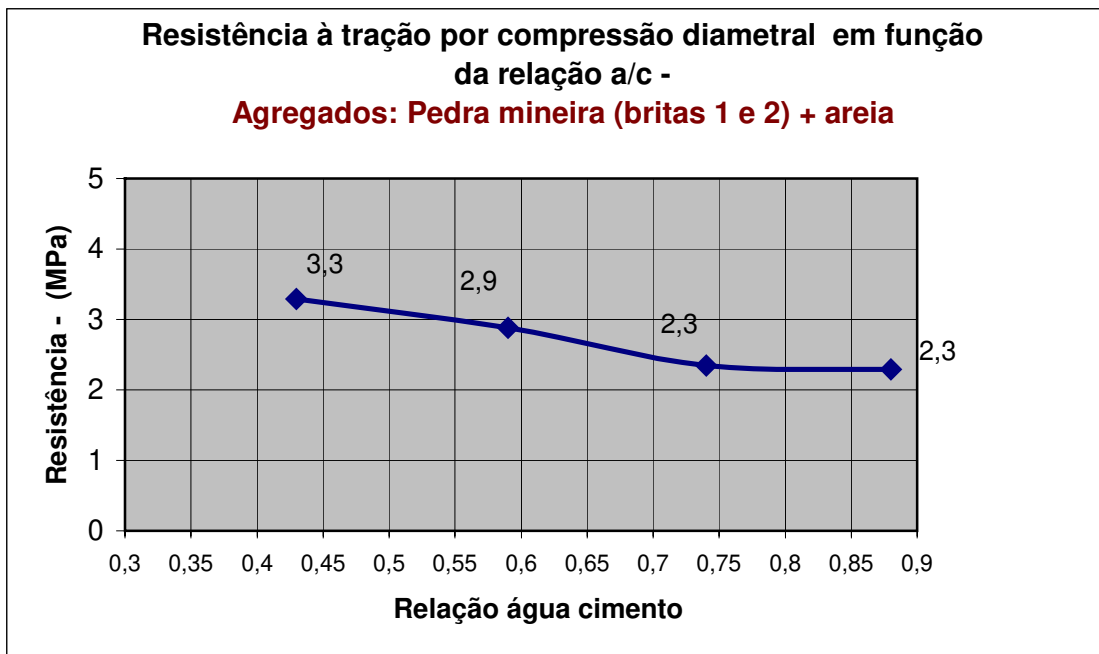


Figura 4.23 – Influência da relação A/C na resistência à tração, Concreto A.

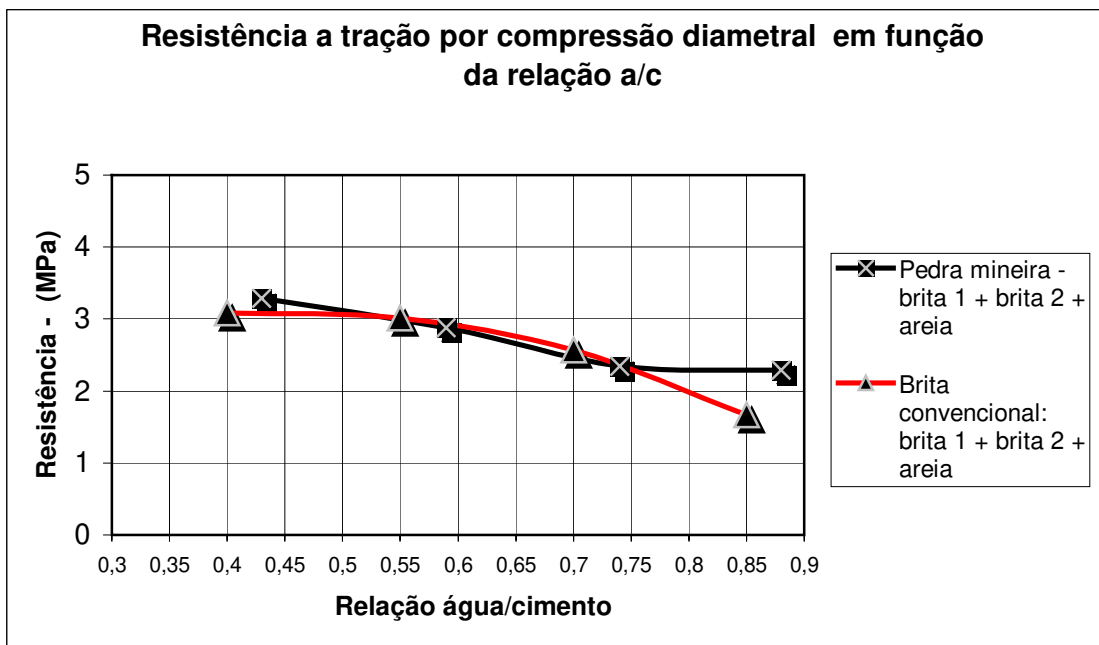


Figura 4.24 - Influência da relação A/C e do tipo de agregado graúdo na resistência à tração.

Tabela 4.22 - Resistência à tração - Concretos do Grupo A
Corpos de prova cilíndricos 150 x 300 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7222/94		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	30%
		BRITA 3:	40%
Proporção materiais secos:	cimento + areia:	58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatim. cm	Cons.cim kg/m ³
T25	3,0	0,44	11,0	1,32	0,50	0,50	0,67	10	529,84
T26	4,5	0,60	10,9	2,19	0,69	0,69	0,92	9	382,36
T27	6,0	0,74	10,6	3,06	0,88	0,88	1,18	6	300,91
T28	7,5	0,90	10,6	3,93	1,07	1,07	1,43	3	246,84

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Área mm ²	TENSOES (Mpa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T25	235000	220000	212500	141372	3,32	3,11	3,01	3,22
T26	222500	195000	195000	141372	3,15	2,76	2,76	2,89
T27	175000	<u>137500</u>	155000	141372	2,48	1,95	2,19	2,33
T28	150000	145000	x	141372	2,12	2,05	x	2,09

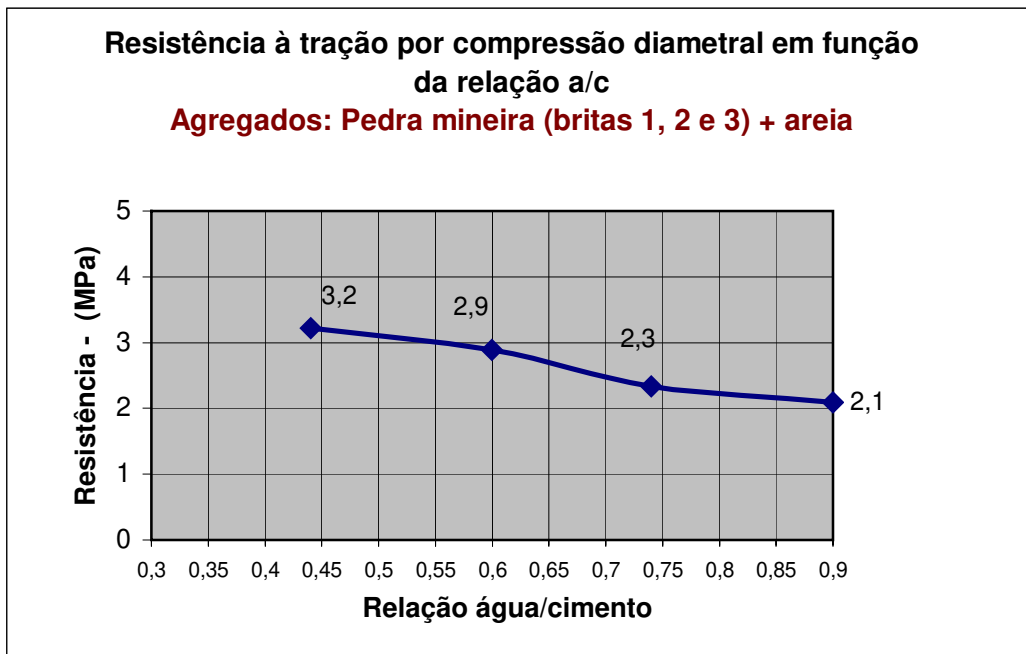


Figura 4. 25- Influência da relação A/C na resistência à tração , Concreto A.

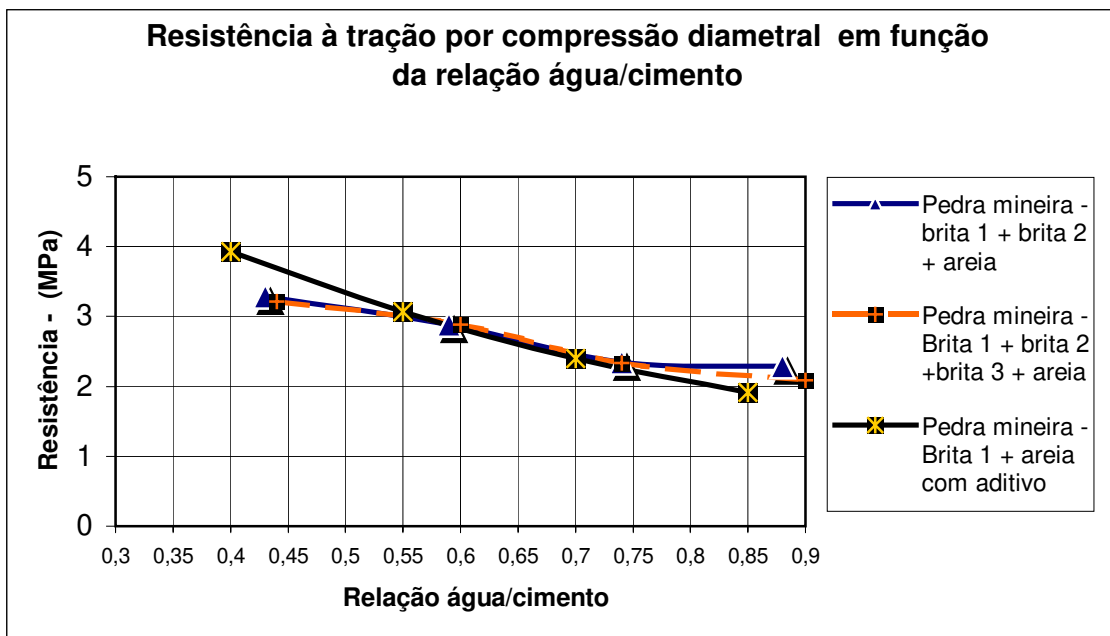


Figura 4. 26- Influência da relação A/C e do tamanho dos agregados graúdos na resistência à tração.

Tabela 4.23 - Resistência à tração - Concretos do grupo B
Corpos de prova cilíndricos - 100 x 200 mm

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7222/94		
Agregado graúdo:	Quartzito residual =	Pedrisco e brita 2	
Agregado miúdo:	Quartzito residual =	Pedrisco	
Aditivo Plastificante:	6 ml/kg de cimento		

Concreto	1:m	a/c	H %	pedrisco	brita 1	brita 2	Σ agreg	Cons.cim. kg/m ³	pedrisco %	Abatim. cm
T14	3,0	0,48	12,00	2,10	0,00	0,90	3,00	523,95	70%	7
T15	4,5	0,62	11,27	3,15	0,00	1,35	4,50	384,01	70%	5
T16	6,0	0,84	12,00	6,00	0,00	0,00	6,00	295,89	100%	1

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	Cargas de Ruptura (N)			Área mm ²	TENSÕES (MPa)			T média
	CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T14	110000	112500	107500	62832	3,50	3,58	3,42	3,50
T15	93500	99000	93500	62832	2,98	3,15	2,98	3,03
T16	69750	78500	74000	62832	2,22	2,50	2,36	2,36

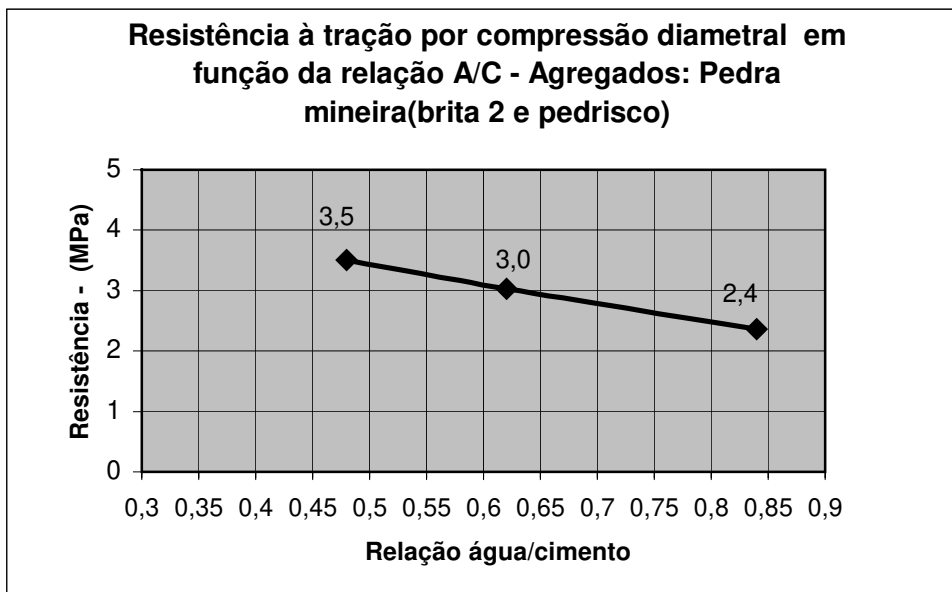


Figura 4.27 - Influência da relação A/C na resistência à tração – Concreto B.

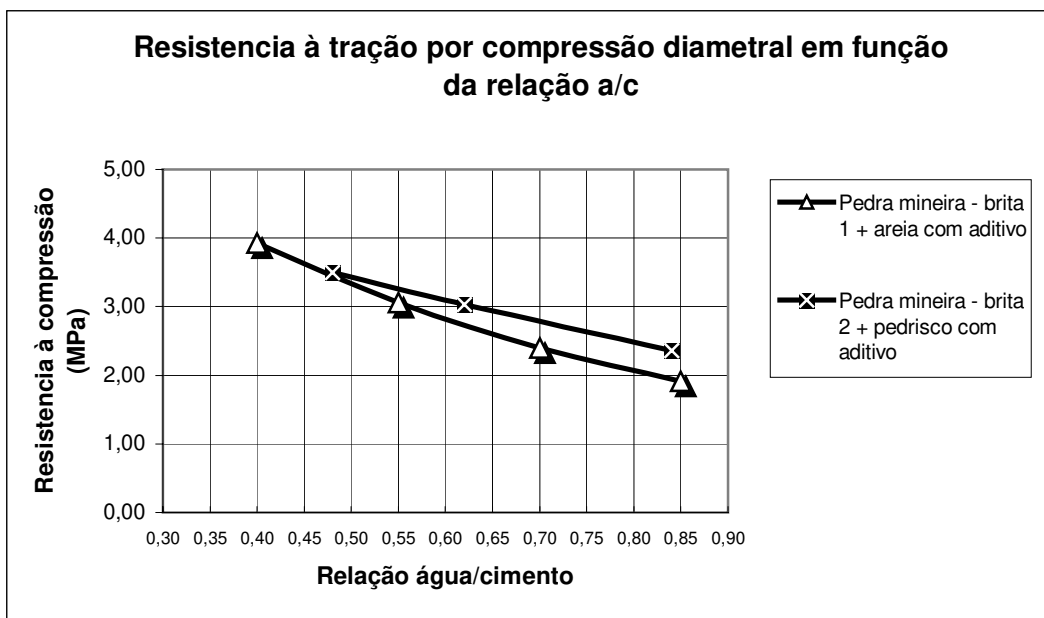


Figura 4.28 - Influência da relação A/C e do tamanho dos agregados na resistência à tração.

Tabela 4.24 - Resistência à tração - Concretos do grupo D
Corpos de prova cilíndricos

Normas: NBR 5738/84; NBR 5739/94; NBR 7222/94			
Agregado graúdo:	Britas convencionais	BRITA 1:	30%
	Rocha: Gnaisse	BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	Abatim. cm	Cons.cim. kg/m ³
T29	3,0	0,40	10	1,32	0,50	1,18	10	541,31
T30	4,5	0,55	10	2,19	0,69	1,62	11	389,81
T31	6,0	0,70	10	3,06	0,88	2,06	5	304,57
T32	7,5	0,85	10	3,93	1,07	2,50	7	249,92

RESULTADOS 28 DIAS

Concreto	d x L	Cargas de Ruptura (N)			Área mm ²	TENSOES (MPa)			T média
		CP1	CP2	CP3		T1	T2	T3	
T29	150x300	220000	215000	167500	141372	3,11	3,04	2,37	3,08
T30	150x300	227500	212500	197500	141372	3,22	3,01	2,79	3,01
T31	150x300	207500	167500	170000	141372	2,94	2,37	2,41	2,57
T32	100x200	55750	53000	48250	62832	1,77	1,69	1,54	1,67

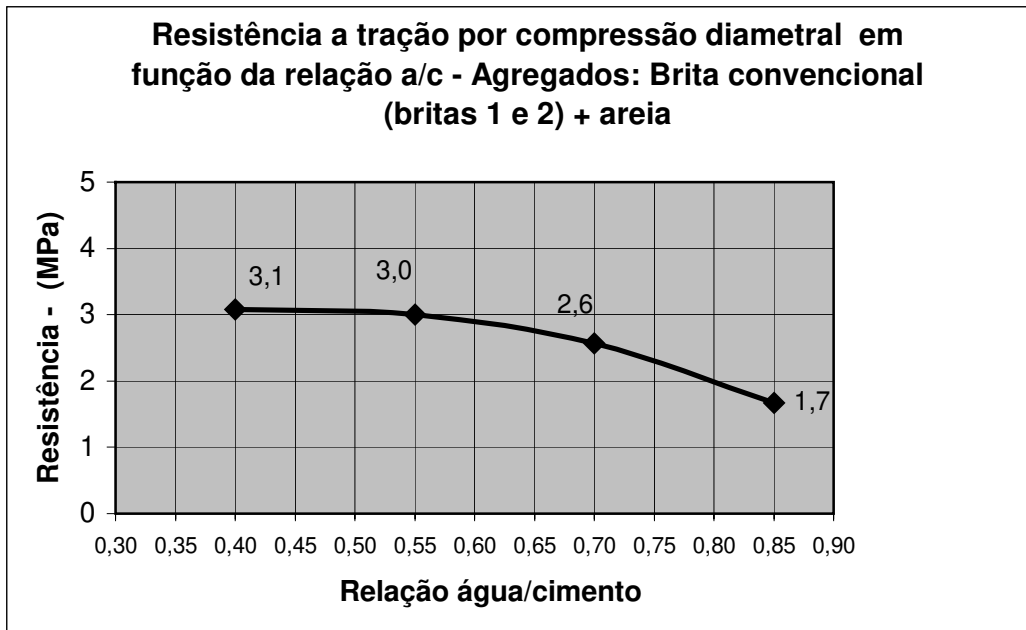


Figura 4.29 - Influência da relação A/C na resistência à tração – Concreto D.

4.5 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO - CONCRETOS DO GRUPO A

Foram determinados os módulos de deformação para os traços T18, T19, T22 e T23 do Concreto A. As planilhas seguintes mostram a dosagem dos concretos, as cargas aplicadas e as deformações específicas correspondentes. Foi também elaborado o gráfico contendo a curva tensão x deformação para cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 4.25 - Módulo de deformação - Concreto do grupo A
Corpo de Prova cilíndrico - T18-

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739; NBR 8522/84; NBR 7223/92.		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	
Aditivo:	6 ml/kg cim		

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita2 2	brita 3	Abatim. cm
T18	4,5	0,55	10,0	2,19	2,31	0	0	7,0
Dimensões do corpo de prova:				d=100 mm	L=200 mm		Área=7896 mm²	

Medidas das Deformações					
Extensôm.1	Extensôm.2	Média	Carga	Deform.	Tensão
Microstrain	Microstrain		tf	Espec.	MPa
ue	ue			(x 10 ⁻⁶)	
-1	-1	-1	0	1	0
-77	-113	-95	2	95	2,53
-176	-236	-206	4	206	5,07
-315	-406	-360	6	360	7,60
-485	-612	-549	8	549	10,13
-665	-843	-754	10	754	12,66
-863	-1110	-986	12	986	15,20
-1098	-1441	-1270	14	1270	17,73
-1207	-1608	-1408	15	1408	19,00
-1349	-1835	-1592	16	1592	20,26
-1512	-2109	-1810	17	1810	21,53
-1598	-2886	-2242	17,8	2242	22,54
		Ruptur:	17,8		22,54

Tensão de Ruptura- σ_R	22,54
MPa	
Tensão- σ_n	
0,4 x σ_R	9,0172
MPa	
$\sigma_{inf} = 0,5 \text{ Mpa}$	0,5
ϵ_n	0,000464
ϵ_o	1,89596E-05
E sec,n - MPa	19138,09
E sec,n - GPa	19,138

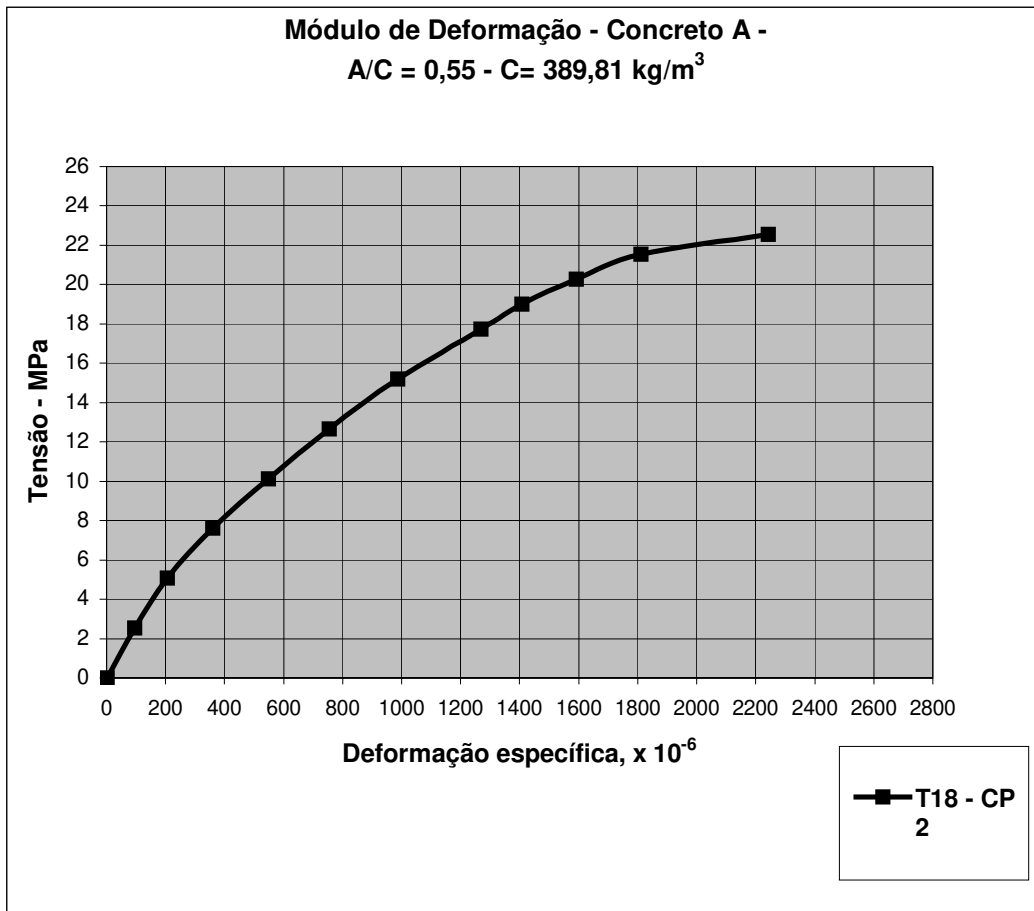


Figura 4.30 – Curva tensão x deformação – Concreto T18, contendo aditivo - Agregados: pedra mineira (brita 1) e areia.

**Tabela 4.26 - Módulo de deformação - Concreto do grupo A -
Corpo de Prova cilíndrico - T19**

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739; NBR 8522/84; NBR 7223/92.		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	100%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%		britas: 42%
Aditivo:	6 ml/kg cim		

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatimento cm
T19	6,0	0,70	10,0	3,06	2,94	0	0	6,0
Dimensões do corpo de prova:				d=100 mm	L=200 mm		Área=7896 mm²	

Medidas das Deformações					
Extensôm.1	Extensôm.2	Média	Carga	Deform.	Tensão
Microstrain	Microstrain		tf	Espec.	MPa
ue	ue			(x 10 ⁻⁶)	
-1	-1	-1	0	1	0
-77	-113	-95	2	95	2,53
-176	-236	-206	4	206	5,07
-315	-406	-360	6	360	7,60
-485	-612	-549	8	549	10,13
-665	-843	-754	10	754	12,66
-863	-1110	-986	12	986	15,20
-1098	-1441	-1270	14	1270	17,73
-1207	-1608	-1408	15	1408	19,00
-1349	-1835	-1592	16	1592	20,26
-1512	-2109	-1810	17	1810	21,53
-1598	-2886	-2242	17,8	2242	22,54
		Ruptura	17,8		22,54

Tensão de Ruptura- σ_R	22,54
Tensão- σ_n	
0,4 x σ_R	9,0172
MPa	
$\sigma_{inf} = 0,5 \text{ MPa}$	0,5
ϵ_n	0,0004545
ϵ_0	1,89596E-05
E sec,n - Mpa	19555,53
E sec,n - GPa	19,556

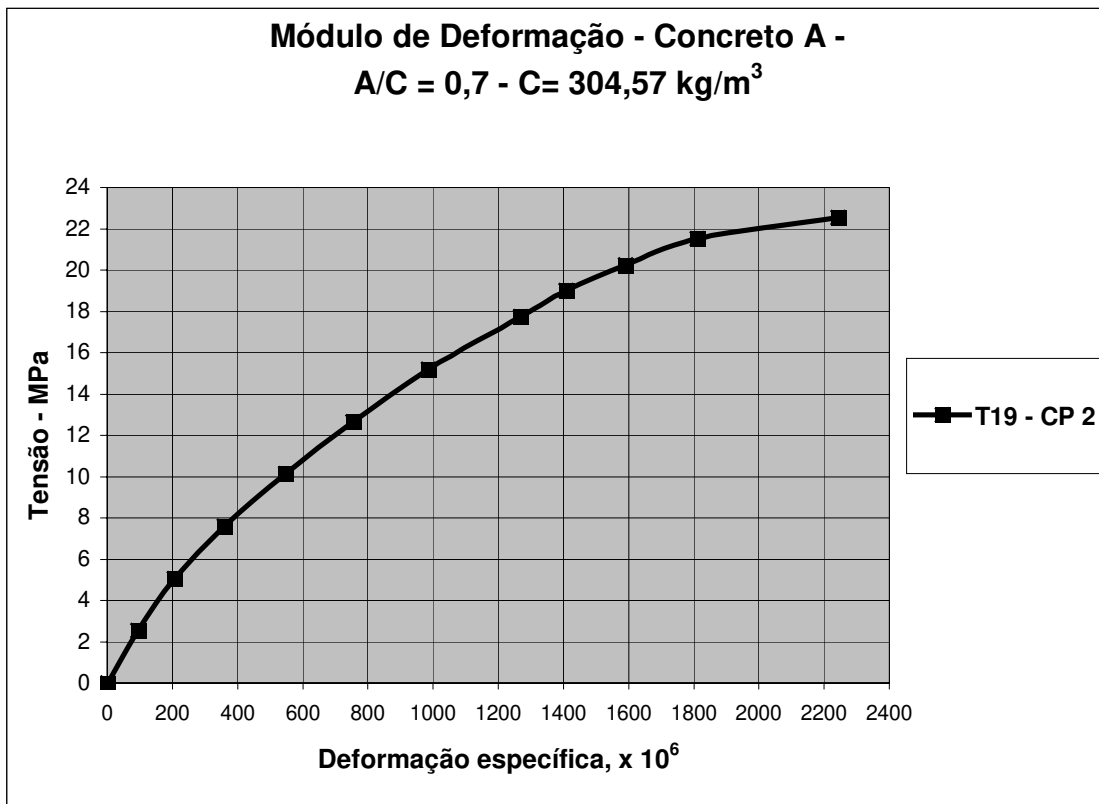


Figura 4.31 – Curva tensão x deformação – Concreto T19, contendo aditivo - Agregados: pedra mineira (brita 1) e areia.

Tabela 4.27 - Módulo de deformação - Concreto do grupo A
Corpo de Prova cilíndrico - T22-1

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739; NBR 8522/84; NBR 7223/92.		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatimento cm
T22	4,5	0,59	10,7	2,19	0,693	1,617	0	6
Dimensões do corpo de prova:				d=150 mm	L=300 mm		Área=18335 mm²	

Medidas das Deformações					
Extensôm. 01	Extensôm. 02	Média	Carga	Deform.	Tensão
Microstrain	Microstrain		tf	Espec.	MPa
ue	ue			(x 10 ⁶)	
0	0	0	0	0	0
-45	-48	-47	2	47	1,09
-115	-135	-125	4	125	2,18
-179	-242	-211	6	211	3,27
-246	-370	-308	8	308	4,36
-310	-496	-403	10	403	5,45
-372	-616	-494	12	494	6,54
-428	-732	-580	14	580	7,64
-483	-853	-668	16	668	8,73
-535	-967	-751	18	751	9,82
-596	-1113	-855	20	855	10,91
-655	-1261	-958	22	958	12,00
-716	-1420	-1068	24	1068	13,09
-776	-1586	-1181	26	1181	14,18
-834	-1764	-1299	28	1299	15,27
-897	-1957	-1427	30	1427	16,36
-974	-2223	-1599	32	1599	17,45
-1061	-2534	-1797	34	1797	18,54
-1145	-2827	-1986	36	1986	19,63
-1363	-3215	-2289	38	2289	20,73
		Ruptura	38,3		20,89

Tensão de Ruptura- σ_R	20,89
MPa	
Tensão- σ_n	
0,4 x σ_R	8,3556
MPa	
$\sigma_{inf} = 0,5 \text{ MPa}$	0,5
ϵ_n	0,000668
ϵ_0	2,32645E-05
E sec,n - MPa	12184,22754
E sec,n - GPa	12,184

**Tabela 4.28 - Módulo de deformação - Concreto do Grupo A -
Corpo de Prova cilíndrico - T22-2**

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739; NBR 8522/84; NBR 7223/92.		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%	britas: 42%	

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatimento cm
T22	4,5	0,59	10,7	2,19	0,693	1,617	0	6
Dimensões do corpo de prova: d=150 mm L=300 mm - A=18335mm²								

Medidas das Deformações					
Extensôm. 01	Extensôm. 02	Média	Carga	Deform.	Tensão
Microstrain	Microstrain		tf	Espec.	MPa
ue	ue			x 10 ⁶	
-4	0	-2	0	2	0
-55	-73	-64	2	64	1,09
-119	-146	-133	4	133	2,18
-187	-229	-208	6	208	3,27
-264	-320	-292	8	292	4,36
-336	-407	-371	10	371	5,45
-410	-494	-452	12	452	6,54
-483	-578	-531	14	531	7,64
-553	-660	-606	16	606	8,73
-622	-740	-681	18	681	9,82
-703	-833	-768	20	768	10,91
-780	-927	-854	22	854	12,00
-864	-1036	-950	24	950	13,09
-942	-1139	-1041	26	1041	14,18
-1027	-1259	-1143	28	1143	15,27
-1110	-1402	-1256	30	1256	16,36
-1201	-1647	-1424	32	1424	17,45
-1308	-1929	-1618	34	1618	18,54
-1389	-2184	-1787	36	1787	19,63
-1495	-2769	-2132	38	2132	20,73
Ruptura			40,5		22,09

Tensão de Ruptura- σ_R	22,09
MPa	
Tensão- σ_n	
0,4 x σ_R	8,8356
MPa	
$\sigma_{inf} = 0,5 \text{ Mpa}$	0,5
ϵ_n	0,000606
ϵ_0	3,1901E-05
E sec,n - MPa	14519,37
E sec,n - GPa	14,519

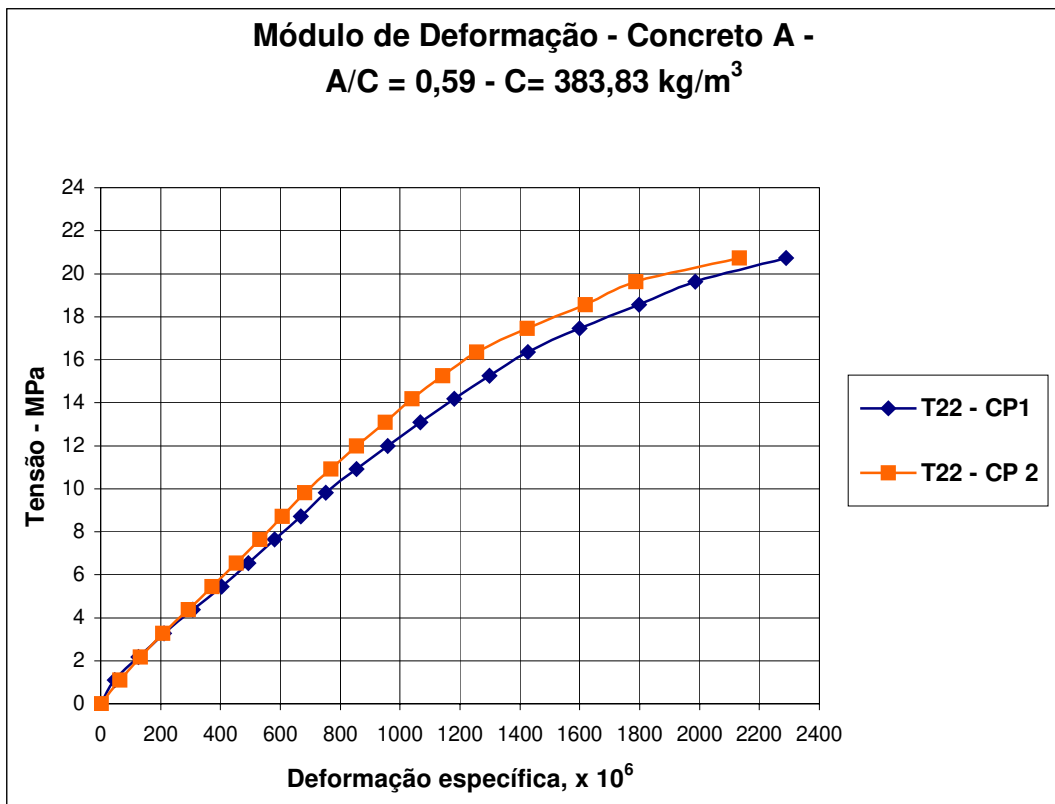


Figura 4.32 – Curva tensão x deformação – Concreto T22 - Agregados: pedra mineira (britas 1 + 2) e areia

**Tabela 4.29 - Módulo de deformação - Concreto do grupo A -
Corpo de Prova cilíndrico - T23-1**

Normas:	NBR 5738/84; NBR 5739; NBR 8522/84; NBR 7223/92.		
Agregado graúdo:	Quartzito residual	BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:	cimento + areia: 58%		britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatimento cm
T23	6	0,74	10,6	3,06	0,882	2,058	0	3
Dimensões do corpo de prova:				d=150 mm	L=300 mm		Área=18335 mm²	

Medidas das Deformações					
Extensôm. 01	Extensôm. 02	Média	Carga	Deform.	Tensão
Microstrain	Microstrain		tf	Espec.	MPa
ue	ue	ue		x 10 ⁶	
-2	-1	-1	0	1	0
-48	-58	-53	2	53	1,09
-109	-119	-114	4	114	2,18
-187	-190	-188	6	188	3,27
-278	-271	-275	8	275	4,36
-365	-355	-360	10	360	5,45
-457	-438	-447	12	447	6,54
-549	-521	-535	14	535	7,64
-633	-609	-621	16	621	8,73
-716	-694	-705	18	705	9,82
-825	-807	-816	20	816	10,91
-933	-930	-931	22	931	12,00
-1058	-1073	-1065	24	1065	13,09
-1193	-1233	-1213	26	1213	14,18
-1315	-1396	-1355	28	1355	15,27
-1381	-1558	-1470	30	1470	16,36
		Ruptura	30		16,36

Tensão de Ruptura- σ_R	16,36
MPa	
Tensão- σ_n	
0,4 x σ_R	6,5449
MPa	
$\sigma_{inf} = 0,5 \text{ Mpa}$	0,5
ϵ_n	0,000447
ϵ_0	0,000026557
E sec,n - MPa	14377,35807
E sec,n - GPa	14,377

**Tabela 4.30 - Módulo de deformação - Concreto do grupo A -
Corpo de Prova cilíndrico - T23-2**

Normas: NBR 5738/84; NBR 5739; NBR 8522/84; NBR 7223/92.			
Agregado graúdo: Quartzito residual		BRITA 1:	30%
		BRITA 2:	70%
Proporção materiais secos:		cimento + areia: 58%	britas: 42%

Concreto	1:m	a/c	H %	areia	brita 1	brita 2	brita 3	Abatimento cm
T23	6	0,74	10,6	3,06	0,882	2,058	0	3
Dimensões do corpo de prova:				d=150 mm		L=300 mm - A=18335mm ²		

Medidas das Deformações					
Extensôm. 0	Extensôm. Média		Carga	Deform.	Tensão
1	2		tf	Espec.	MPa
ue	ue	ue		x 10 ⁶	
-7	-3	-5	0	5	0
-75	-4	-40	2	40	1,09
-154	-69	-112	4	112	2,18
-248	-143	-196	6	196	3,27
-339	-238	-289	8	289	4,36
-432	-338	-385	10	385	5,45
-519	-440	-480	12	480	6,54
-615	-546	-581	14	581	7,64
-705	-653	-679	16	679	8,73
-805	-765	-785	18	785	9,82
-922	-890	-906	20	906	10,91
-1059	-1032	-1046	22	1046	12,00
-1230	-1194	-1212	24	1212	13,09
-1423	-1369	-1396	26	1396	14,18
-1683	-1595	-1639	28	1639	15,27
-2391	-2195	-2293	30	2293	16,36
		Ruptura	30		16,36

Tensão de Ruptura- σ_R	16,36
MPa	
Tensão- σ_n	
0,4 x σ_R	6,5449
MPa	
$\sigma_{inf} = 0,5 \text{ Mpa}$	0,5
ϵ_n	0,000447
ϵ_0	1,9938E-05
E sec,n -	14154,5245
MPa	
E sec,n -	14,155
GPa	

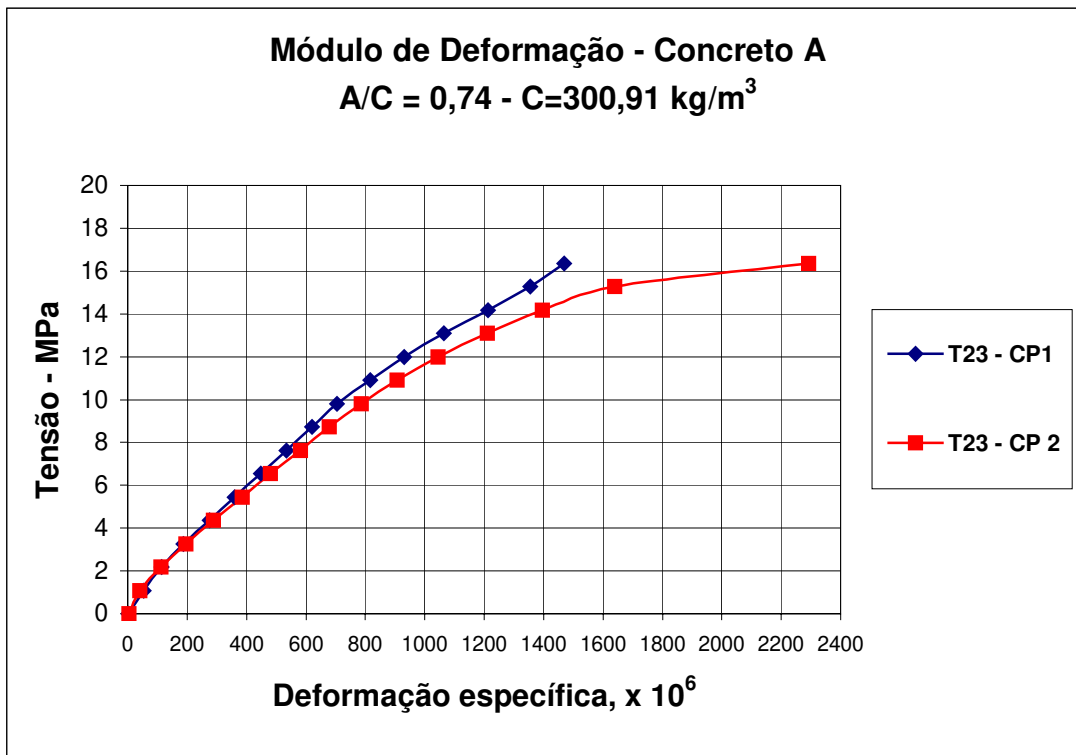


Figura 4.32 – Curva tensão x deformação – Concreto T23 - Agregados: pedra mineira (brita 1 e 2) e areia

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DOS AGREGADO DE PEDRA MINEIRA,

Do conjunto de observações feitas durante os ensaios, comparadas com a literatura, destaca-se o seguinte:

- ❑ Os agregados de pedra mineira, obtidos através da britagem manual e posterior separação por peneiramento dos resíduos, tiveram redução na quantidade de partículas alongadas e lamelares por ocasião da britagem, mas a quantidade destas partículas ainda continuou elevada e admitida, através de observação visual, em torno de 30% do total.
- ❑ Observando-se os corpos de prova fabricados com os agregados graúdos de pedra mineira, durante os ensaios da presente pesquisa, verificou-se que existiam na região da ruptura agregados rompidos e também agregados arrancados da pasta. Isto mostra que a aderência dos agregados pesquisados pode ser aceitável para o concreto. Observou-se também que a quantidade de agregados rompidos foi menor ou aproximadamente igual à de agregados

separados da pasta de cimento, indicando que a resistência do agregado é também aceitável.

- ❑ Analisando-se os agregados da presente pesquisa, pode-se afirmar, por observação visual e tátil, que são mais ásperos que os agregados graúdos geralmente usados para concreto.
- ❑ Os agregados pesquisados, constituídos pela rocha quartzito, apresentando características de quartzito micáceo, possuem partículas friáveis em pequena quantidade.
- ❑ Durante a realização dos ensaios de moldagem dos corpos de prova, foi possível avaliar a influência da granulometria na trabalhabilidade do concreto. Nos traços onde os agregados constituídos por resíduos de pedra mineira foram usados sem qualquer “tratamento” granulométrico (“pedrisco” usado nos concretos do grupo B) houve dificuldade para se conseguir um abatimento de tronco de cone mínimo, mesmo com utilização de aditivo plastificante. A grande quantidade de materiais finos formada exigia relação água/cimento elevada e incompatível com a qualidade esperada para o concreto. Foi necessário alterar as composições, incluindo-se agregados separados por peneiras e de maiores dimensões, o que resultou abatimento em torno de 60 mm.

5.2 CONCRETOS DA PRIMEIRA ETAPA

Analisando-se os resultados de resistência à compressão para os concretos do grupo A da primeira etapa, observa-se que o valor mínimo obtido foi de 13,54 MPa, relação água/cimento de 0,75 e o máximo foi de 21,41MPa, com relação água cimento 0,5. Na moldagem dos corpos de prova que resultaram este valor máximo a quantidade

de areia foi aumentada em relação às britas, obtendo-se um concreto de melhor consistência e os corpos de prova não apresentaram nenhum tipo de falha.

As dosagens dos concretos da segunda etapa foram definidas, conforme já mencionado, aumentando-se a quantidade de areia em relação às britas, e em alguns casos aumentando-se ligeiramente a relação água/cimento. Esperou-se para a segunda etapa de ensaios uma melhor uniformidade nos resultados e elevação das resistências à compressão. As resistências obtidas foram superiores e houve uniformidade na maior parte dos resultados. Foram obtidos entretanto valores divergentes para alguns concretos, que motivaram a desconsideração destes valores, conforme literatura.

Os corpos de prova cúbicos, referentes ao Concreto C tiveram resistência à compressão de 12,93 e 14,02MPa, bem menor que as obtidas com Concreto A, motivo pelo que não foram mais fabricados estes concretos.

5.3 CONCRETOS DA SEGUNDA ETAPA – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nos concretos da segunda etapa houve alteração nas dosagens, no tipo de cimento, que passou a ser o CP-III, como medida preventiva diante da possibilidade de reação álcali agregado e também no processo de cura, que passou a ser submersa no lugar de cura úmida. Ganhos de resistência à compressão foram observados. Analisando-se a proporção cimento/agregado 1 : 6, comum às duas etapas, observou-se que os resultados limites para a primeira etapa foram 14,19 e 17,03 MPa, enquanto na segunda etapa, considerando apenas os CP cilíndricos, os resultados limites cresceram para 15,7 e 21,15 MPa.

As tabelas 5.1 e 5.2 mostram um panorama geral dos resultados dos ensaios de compressão, para os concretos tendo a pedra mineira como agregado graúdo (grupo A) e para os concretos tendo a pedra mineira como agregado graúdo e miúdo (concretos do grupo B), constituindo-se uma referência para os futuros interessados em utilizar mais esta alternativa para aproveitamento da pedra mineira.

Tabela 5.1 - Resumo das resistências à compressão obtidas - corpos de prova cilíndricos e cúbicos – Concreto do grupo A – Cimento CP-III - 32.

RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO (MPa)									
Proporção cimento /agregado		1 : 3,0		1 : 4,5		1 : 6		1 : 7,5	
Consumo de cimento (kg/m³)		540	530	390	380	305	300	250	245
Relação água/cimento		0,4	0,43	0,55	0,59	0,7	0,74	0,85	0,88
AGREGADOS	CP								
Brita 1 + areia de rio (com aditivo plastificante)	Cilindros	30,05		26,30		21,15		14,05	
	Cubos	37,33		31,67		23,72		16,61	
Brita 1 + brita 2 + areia de rio	Cilindros		27,71		21,71		16,44	15,86	
	Cubos		36,44		28,19		20,89	14,58	
Brita 1 + brita 2 + brita 3 + areia de rio	Cilindros		29,68		22,09		15,70		12,68
	Cubos		32,78		27,00		20,26		14,56

Tabela 5.2 - Resumo das resistências à compressão obtidas – corpos de prova cilíndricos e cúbicos – Concreto B.

RESISTENCIAS À COMPRESSÃO (MPa)				
Proporção cimento /agregado		1 : 3,0	1 : 4,5	1 : 6
Consumo de cimento (kg/m³)		523	384	295
Relação água/cimento		0,48	0,62	0,84
AGREGADOS	CP			
Brita 2 + pedrisco (com aditivo plastificante)	Cilindros	32,44	22,23	-
	Cubos	30,93	26,78	-
Pedrisco (com aditivo plastificante)	Cilindros	-	-	16,15
	Cubos	-	-	20,94

As análises das tabelas 5.1 e 5.2 permitiram que se destacasse o seguinte:

- ❑ Observa-se que a resistência à compressão dos concretos esteve compreendida entre patamares comuns aos concretos convencionais, sendo que o menor resultado verificado foi de 12,68 MPa, com consumo de cimento de 245 kg/m³. A maior resistência obtida foi de 37,33 MPa, com consumo de cimento de 540 kg/m³.
- ❑ As resistências obtidas nos concretos contendo 100% de brita 1 como agregado gráudo, areia de rio como agregado miúdo e aditivo plastificante mostraram claras vantagens com relação aos demais concretos contendo pedra mineira. METHA & MONTEIRO (1994) consideram dois efeitos da mudança de diâmetro máximo do agregado: para um mesmo teor de cimento e mesma consistência do concreto, partículas maiores exigem menos água de amassamento que

partículas menores; por outro lado, agregados grandes tendem a formar zonas de transição mais fracas, contendo mais microfissuras, prejudicando a resistência dos concretos com tamanho máximo maior. No caso dos concretos estudados este segundo efeito se mostrou predominante.

- A resistência obtida nos corpos de prova cúbicos foi superior à obtida nos corpos de prova cilíndricos, confirmando as informações da literatura. Foram observados apenas dois valores de resistência de cubos inferiores às de cilindros, referentes a dois traços em um total de quinze traços estudados na segunda etapa. O aumento da resistência dos cubos ficou geralmente entre 10 e 20%.
- Os concretos contendo 100% dos agregados constituídos de pedra mineira apresentaram elevada quantidade de finos e tiveram as relações água/cimento superiores aos concretos contendo mesmo consumo de cimento. Entretanto as resistências se mantiveram semelhantes ou até mesmo superiores às resistências dos demais concretos com consumo de cimento aproximado, conforme pôde ser observado na figura 4.17. Estes concretos superaram as expectativas quanto à resistência.

Para as misturas contendo, como agregado graúdo, 70% de brita 2 e 30 % de brita 1, foram feitas misturas com britas convencionais usadas na região, seguindo-se a mesma proporção entre os agregados e mesma proporção cimento/agregado, possibilitando a comparação entre as resistências. A análise comparativa dos concretos com agregados de pedra mineira e agregados convencionais foi feita considerando-se os valores das tabelas 5.3 e 5.4, onde se encontra o resumo das resistências em função da relação água/cimento. Considerando que as relações água cimento tiveram alterações comparando-se concretos dos grupos A e D, foram calculadas novas tensões médias para o grupo D, referentes às relações água/cimento usadas para o grupo A, através dos gráficos referentes aos concretos do grupo D.

Tabela 5.3 – Resumo das resistências à compressão dos concretos dos grupos A e D, contendo 30% de brita 1 e 70% de brita 2, CP cilíndricos.

Proporção Cim./agreg.	Relação a/c			Tensão média Cilindros – (MPa)			σ_A/σ_D
	Ensaio Concr. A	Ensaio Concr. D	Adot. Concr. D	Ensaio Concr. A	Ensaio Concreto D	Calculada Concreto D^{*2}	
1 : 3,00	0,43	0,40	0,43	27,71	34,03	32,90	0,84
1 : 4,50	0,59	0,55	0,59	21,95	28,38	26,00	0,84
1 : 6,00	0,74	0,70	0,74	16,58	19,32	17,00	0,98
1 : 7,50	0,88	0,85	0,88	15,70 ^{*1}	11,88	-	-

^{*1}: Valor não usado para comparação, pois o abatimento de tronco de cone foi de apenas 20 mm, abaixo do mínimo recomendável de 50 mm.

^{*2}: Estas tensões foram obtidas do gráfico da figura 4.18, referentes às relações água/cimento adotadas para o concreto D.

Tabela 5.4 – Resumo das resistências à compressão dos concretos dos grupos A e D, contendo 30% de brita 1 e 70% de brita 2, CP cúbicos.

Proporção Cim./agreg.	Relação a/c			Tensão média - Cubos –(MPa)			σ_A/σ_D
	Ensaio Concr. A	Ensaio Concr. D	Adot. Concr. D	Ensaio Concreto A	Ensaio Concreto D	Calculada Concreto D* ²	
1 : 3,00	0,43	0,40	0,43	36,44	33,1* ¹	-	-
1 : 4,50	0,59	0,55	0,59	28,19	30,96	28,30	1,00
1 : 6,00	0,74	0,70	0,74	20,89	20,89	19,06	1,10
1 : 7,50	0,88	0,85	0,88	14,56	13,96	12,62	1,15

*¹: Este valor não foi considerado para comparação pois o mesmo ficou bastante afastado da curva de Abrams.

*²: Estas tensões foram obtidas do gráfico da figura 4.21, referentes às relações água/cimento adotadas para o concreto D.

A análise das tabelas 5.3 e 5.4, permitiram as considerações seguintes:

- Os resultados dos corpos de prova cilíndricos revelaram pequenas reduções nas resistências dos concretos com britas de pedra mineira, sendo a redução máxima verificada igual a 16%. Para a dosagem com menor consumo de cimento, na proporção cimento/agregado 1,00 : 7,50, a resistência alcançada pelos concretos contendo pedra mineira foi ligeiramente superior.
- Os resultados dos corpos de prova cúbicos revelaram resistências aproximadamente iguais ou maiores para os concretos contendo pedra mineira, ocorrendo elevação de até 15% para o concreto com proporção cimento

/agregado 1,00 : 7,50, ou seja, para o concreto mais pobre. O melhor desempenho dos corpos de prova cúbicos esteve relacionado provavelmente com a maior facilidade de adensamento, considerando a ocorrência de partículas lamelares.

- A vantagem esperada da brita convencional foi pouco expressiva, observando-se maiores resistências alternadas entre misturas com pedra mineira e com brita convencional.

Enfim, conforme foi proposto neste trabalho, a tabela 5.5 apresenta sugestões para o uso da pedra mineira no concreto, considerando-se como parâmetro a resistências à compressão obtida para os concretos do grupo A, segunda etapa. Foram considerados apropriados para concreto estrutural apenas os concretos com resistências superiores a 20 MPa, com exceção dos concretos ciclóricos e de sapatas corridas, que trabalham geralmente com tensões baixas. É claro que, para as dosagens onde o abatimento foi inferior a 50 mm, há necessidade de se aumentar a porcentagem de britas maiores, ou a relação água/cimento. Outra opção é incluir aditivo plastificante ou até mesmo superplastificante se não houver impedimento de ordem econômica.

Naturalmente a dimensão máxima do agregado a ser adotado também deve ser analisada, de acordo com as dimensões do elemento de concreto a ser fabricado.

Tabela 5.5 - Resumo das resistências mínimas de acordo com o consumo de cimento e indicações para o uso da pedra mineira como agregado considerando-se a resistência à compressão.

Proporção cimento /agregado	1 : 3,0		1 : 4,5		1 : 6		1 : 7,5	
Consumo de cimento (kg/m³)	540	530	390	380	305	300	250	245
Relação água/cimento	0,40	0,43	0,55	0,59	0,70	0,74	0,85	0,88
Resistências à compressão mínimas alcançadas MPa – (eliminados os valores extremos)	30,05 (T17)	27,71 (T21)	26,30 (T1)	21,71 (T18)	21,15 (T19)	15,70 (T27)	14,05 (T20)	12,68 (T28)
Concreto pré-fabricado:								
☐ Elementos estruturais: blocos para alvenaria.	♦♦		♦♦		♦		X	
☐ Elementos estruturais: trilhos para laje pré-fabricada; vigas e colunas; vergas.	♦♦		♦♦		♦♦	X	X	
☐ Elementos não estruturais: placas de vedação (muros, divisórias); blocos de vedação; meio-fios e outros.	♦		♦		♦♦		♦♦	
Concreto estrutural moldado na obra:								
☐ Concreto ciclópico para sapatas corridas	♦		♦♦		♦♦		♦♦	
☐ Vigas e pilares de edificações	♦♦		♦♦		X		X	
☐ Lajes de edificações	♦♦		♦♦		X		X	

♦♦	RECOMENDÁVEL
♦	ACEITÁVEL
X	NÃO APLICÁVEL

E importante destacar que a possibilidade de reação álcali agregado deletéria deve ser eliminada, o que pode ser obtido através da utilização de cimento contendo teor de escória superior a 60%. Caso esta condição não possa ser atendida, deverão ser adotadas outras medidas preventivas.

5.4 – ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DOS CONCRETOS

Conforme já era previsto, houve uma certa dificuldade para se produzir concretos trabalháveis contendo pedra mineira. A grande quantidade formada de partículas alongadas e lamelares, conforme já relatado, determina maior superfície externa e conseqüentemente maior consumo de água de amassamento para mesmo abatimento que outro concreto com partículas mais próximas de cúbicas. Foram aumentadas as relações água/cimento das misturas sem aditivo e mesmo assim ainda foram obtidos concretos com abatimentos inferiores a 50 mm, como era previsto nesta pesquisa.

A fabricação do concreto com agregado de pedra mineira ilustra a situação em que as partículas são rapidamente envolvidas com pasta de cimento, que impede a entrada de água necessária à saturação do agregado. Isso se aplica ao agregado graúdo, em que a água tem que se deslocar da superfície para o interior da partícula. Como resultado a relação água/cimento efetiva foi maior do que seria caso houvesse a total absorção de água pelo agregado, pois a pedra mineira tem absorção maior que a dos agregados usuais e as misturas mais ricas em cimento tiveram abatimento de tronco de cone maior do que as misturas mais pobres com a mesma porcentagem de água com relação aos materiais secos. Nas misturas mais pobres houve maior absorção de água, resultando um concreto com “abatimento” menor.

A utilização de aditivo foi fundamental para se conseguir concretos trabalháveis, principalmente para as misturas com substituição total dos agregados pela pedra mineira, para os quais seria inviável a utilização sem o aditivo.

5.5 RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As resistências à tração obtidas tiveram melhor uniformidade nos resultados de cada concreto estudado e os valores obtidos podem ser considerados compatíveis com a utilização em concretos estruturais.

Foi observada superioridade nas resistências à tração encontradas nas misturas contendo pedra mineira, com relação às misturas com britas convencionais nos traços 1 : 3 e 1 : 7,5. Nos traços 1 : 4,5 e 1 : 6 as resistências foram aproximadamente iguais.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), os agregados de textura rugosa ou britado apresentam maior resistência, principalmente à tração, nas primeiras idades, que um concreto correspondente contendo agregado liso. Observa-se que os agregados de pedra mineira são mais rugosos do que os agregados convencionais. Esse fato pode justificar as melhores resistências obtidas para concretos fabricados com resíduo de pedra mineira.

5.5 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Os módulos de deformação para compressão obtidos ficaram entre 19,556 GPa e 12,184 GPa. Os módulos correspondentes aos traços T18 e T19, respectivamente

iguais a 19,138 GPa e 19,556 GPa são valores normais para o concreto. Os módulos referentes aos traços T22 (12,184 GPa e 14,519 GPa) e T23 (14,377 e 14,155) podem ser considerados aceitáveis para concretos.

6. CONCLUSÕES

Após a realização de todos os ensaios propostos, análise dos resultados obtidos, e depois de concluída a pesquisa bibliográfica, investigação documental e pesquisa de campo, foi possível responder:

O concreto contendo os resíduos da pedra mineira é tecnicamente viável?

A resposta é “sim”, conforme resultados apresentados nos capítulos 4 e 5. A partir das propriedades verificadas nos ensaios, considerando-se os resultados seguros obtidos sobre a utilização dos agregados no concreto, foi possível a sugestão de uso dos concretos estudados para as finalidades a seguir relacionadas, considerando-se as resistências à compressão obtidas:

Concreto pré-fabricado:

- ❑ Elementos estruturais: blocos para alvenaria;
- ❑ Elementos estruturais: trilhos para laje pré-fabricada, vigas, colunas e vergas.

Elementos não estruturais

- ❑ Placas de vedação (muros, divisórias); blocos de vedação; meio-fios e outros.

Concreto estrutural moldado na obra:

- ❑ Concreto ciclópico para sapatas corridas
- ❑ Vigas e pilares de edificações
- ❑ Lajes de edificações

Dentro das indicações para o uso do quartzito, os concretos pré-fabricados são sugeridos porque a produção industrializada, têm geralmente um controle de qualidade melhor, minimizando os erros grosseiros de fabricação e execução, relacionados com dosagem, lançamento, adensamento e cura freqüentemente verificados em obra. É claro que estes erros são indesejáveis em qualquer tipo de concreto, mas no caso de utilização dos agregados de pedra mineira eles podem comprometer a aceitação e o uso dos referidos agregados conforme proposto neste trabalho de pesquisa, pois os referidos erros podem levar a um julgamento desfavorável e indevido dos agregados pesquisados. Os resultados negativos relacionados com erros de fabricação e execução podem ser atribuídos indevidamente aos agregados de pedra mineira.

A produção em concreteiras também seria interessante, pois haveria um melhor controle de qualidade na fabricação, transporte e lançamento do concreto.

Os agregados de pedra mineira devem ser usados preferencialmente com cimento de alto forno CPIII, tendo o teor de escória granulada de alto forno superior a 60%, como medida preventiva da reação álcali-agregado, e para favorecer a durabilidade do concreto de um modo geral. Caso esta condição não possa ser atendida, deverão ser adotadas outras medidas preventivas. Este tipo de cimento,

necessita entretanto de cura úmida ou submersa, para que seja atingida a resistência máxima de acordo com a idade do concreto.

No caso de utilização dos agregados de pedra mineira em concretos de barragens, pontes, bem como certos tipos de fundações e elementos estruturais constantemente em contato com a água, é conveniente a realização de estudos e ensaios de laboratório que proporcionem o controle da RAA e a durabilidade da estrutura durante sua vida útil.

Os agregados pesquisados têm características que não são consideradas as mais indicadas para agregados. A granulometria pode não ser inicialmente a ideal, devido à quantidade de finos superior ao recomendável formada durante a britagem, mas esta característica pode ser regularizada através da separação dos agregados por peneiras, como foi feito neste trabalho de pesquisa. A britagem dos agregados de pedra mineira usados nesta pesquisa, conforme relatado, foi feita manualmente. Este fato e também a estrutura lamelar da rocha quartzito ocasionaram uma quantidade de partículas alongadas e principalmente lamelares superior ao desejável, que aumentam as chances de formação de vazios internos nos corpos de prova e dificultam o adensamento. Foi também constatada a presença de partículas friáveis em pequena quantidade.

No caso da produção de agregados de pedra mineira chegar a ser industrializada, todas estas características consideradas indesejáveis podem ser melhoradas. Utilizando-se equipamento apropriado, é possível se obter agregados angulosos e com a medida das três dimensões mais próximas entre si. Neste caso a tendência é de se alcançar resultados melhores que os obtidos nesta pesquisa.

Os objetivos da pesquisa foram alcançados, pois as resistências à compressão e à tração por compressão diametral foram definidas para diversas dosagens, conforme previsto no início do trabalho. O módulo de deformação também foi definido para determinados traços do concreto contendo pedra mineira. Os resultados foram

satisfatórios, considerando-se que os agregados têm características que não são consideradas as mais indicadas para agregados, conforme relatado.

Os resultados obtidos mostram que os agregados pesquisados podem ser utilizados em concretos, proporcionando resistência à compressão satisfatória e viabilidade econômica, considerando-se os valores máximos e mínimos alcançados para composições estudadas, em comparação com os concretos contendo agregados convencionais.

A comparação entre os resultados obtidos para concretos com agregados convencionais e com agregados de pedra mineira revelaram pequenas reduções nas resistências dos concretos com britas de pedra mineira, sendo a redução máxima verificada igual a 16%, referente a concretos com maior consumo de cimento, com proporções cimento/agregado 1,00 : 3,00 e 1,00 : 4,50. Para as dosagens com menor consumo de cimento (300 e 250 Kg/ m³), nas proporções cimento/agregado 1,00 : 6,00 e 1,00 : 7,50, a resistência alcançada pelos concretos contendo pedra mineira foi ligeiramente superior. Para os corpos de prova cúbicos a resistência à compressão foi igual ou ligeiramente superior para menores consumos de cimento. Ficou evidente dessa forma a tendência de serem equivalentes os resultados para baixos consumos de cimento, demonstrando-se a vantagem de utilização da pedra mineira nesses concretos.

A utilização de aditivo foi uma alternativa eficiente, pois possibilitou relação água/cimento menor, resultando misturas mais trabalháveis, com exceção apenas de um traço, contendo 100% de material passante na peneira de 9,5 mm. O abatimento de tronco de cone para os concretos contendo brita 1, areia e aditivo ficou compreendido entre 60 e 110 mm.

Ficou demonstrada neste trabalho de pesquisa a viabilidade de utilização também do material passante na peneira de 9,5 mm (pedrisco), pois, mesmo sendo um material com grande quantidade de finos (anexo A, planilha A2), as resistências à

compressão se mantiveram próximas daquelas obtidas para as misturas com britas e areia de rio, com consumo de cimento aproximadamente igual (figura 4.17).

As diferenças de resultados ocorridas entre conjuntos de três corpos de prova de mesmo concreto podem estar relacionadas com deficiências de adensamento, que podem ocorrer em concretos com muitas partículas alongadas e lamelares. Este fato pode também justificar as resistências à compressão superiores (em mais de 20 %) para corpos de prova cúbicos, pois a maior área da seção transversal favorece o adensamento.

A realização de novos ensaios é sempre desejável para a definição de limites de resistências de concretos, que tenham em sua composição um material diferente do padronizado, como é caso da pedra mineira. Assim, os futuros interessados, tomando por base os resultados obtidos nesta pesquisa, terão facilidade de direcionar as dosagens para a obtenção de um concreto que melhor atenda às suas necessidades.

A extração da pedra mineira no sudoeste de Minas Gerais pode se tornar uma atividade mais rentável e menos prejudicial ao ambiente, pelo aproveitamento dos resíduos no concreto, como se procurou incentivar com esta pesquisa. Pelo que foi observado, a utilização é viável e pode ser delimitada com segurança e economia. O descarte dos resíduos representa um desperdício inaceitável de material, que poderia estar gerando renda e melhor equilíbrio ambiental na região produtiva.

Se o uso da pedra mineira no concreto se tornar habitual, é também presumível haver a determinação de um preço para os resíduos de pedra mineira, atualmente considerados como “lixo” e obtidos a custo zero nas jazidas de exploração. Cabe também aos produtores de pisos e revestimentos de pedra mineira incentivar o uso dos resíduos para o seu próprio interesse, pois as despesas com descarte seriam reduzidas e haveria a receita adicional da comercialização do produto. A disponibilidade de uma nova alternativa técnica para estes resíduos beneficiará a sociedade como um todo.

Enfim, muito ainda precisa ser feito com relação a pesquisas experimentais, para que sejam exploradas todas as possibilidades de utilização desta nova alternativa para agregados e os resíduos sejam totalmente aproveitados, atingindo uma fatia do mercado compatível com suas potencialidades.

ANEXOS

ANEXO A – Caracterização Física dos Agregados:
Granulometria
Massa Unitária, Massa específica, Absorção

Tabela A1 - Granulometria do agregado miúdo

Material:	Areia Grossa
Procedência:	Rio Grande - Passos
NORMAS:	NBR 7217/87
Massa	500 g

Peneiras	Massa	% retida	% retida
(mm)	retida (g)		acumulada
9,5	0	0,00	0,00
4,8	1	0,20	0,20
2,4	11	2,24	2,44
1,2	69	13,84	16,29
0,6	208	41,66	57,95
0,3	185	37,08	95,03
0,15	22	4,49	99,52
0	2	0,36	99,88
			fundo
Soma	499		371,31
Módulo de Finura			3,71
Dimensão máxima característica			2,4 mm

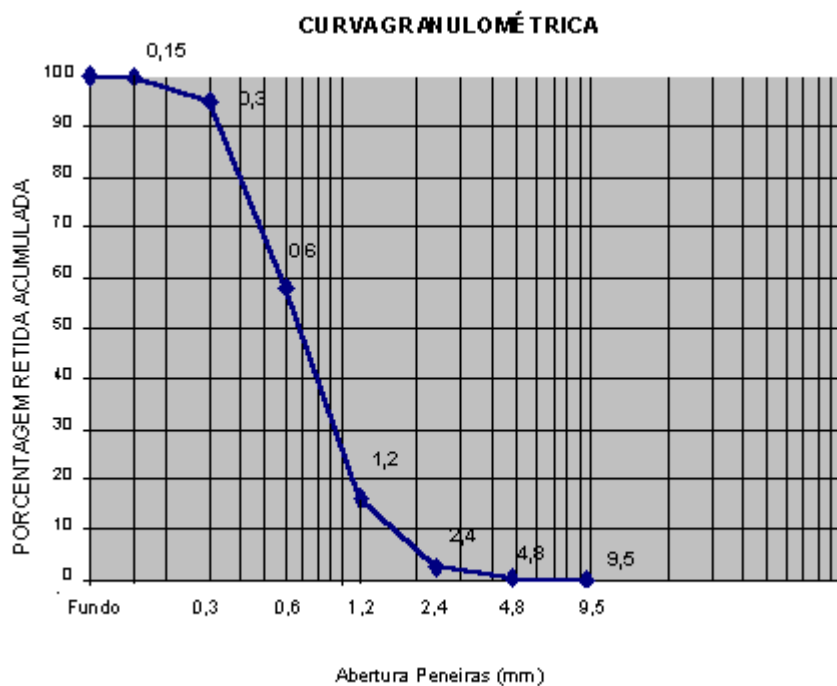


Tabela A2 - Granulometria do pedrisco

Material:	Pedrisco - Amostra 1
Procedência:	Serra da Babilônia - S.J.B. do Glória
NORMA:	NBR 7217/87
Massa	3 kg

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulad a	
9,5	0,00	0,00	0,00	
6,3	165,42	5,51	5,51	
4,8	185,40	6,18	11,69	
2,4	462,72	15,42	27,12	
1,2	374,28	12,48	39,59	
0,6	227,46	7,58	47,18	
0,3	200,52	6,68	53,86	
0,15	294,72	9,82	63,68	
0	1089,36	36,31	100,00	fundo
Soma	2999,88	100,00	348,64	
Módulo de Finura			3,43	
Dimensão máxima			9,5 mm	

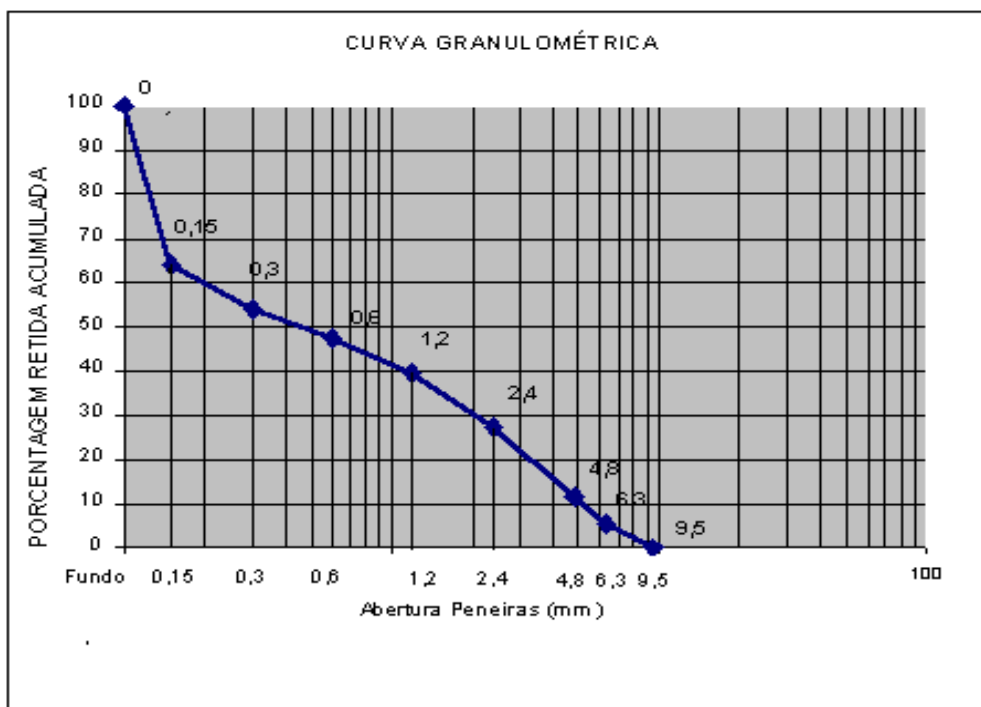


Tabela A3 - Granulometria do pedrisco

Material:	Pedrisco - Amostra 2
Procedência:	Serra da Babilônia - S.J.B. do Glória
NORMA:	NBR 7217/87
Massa	3 kg

Peneiras	Massa	% retida	% retida
(mm)	retida (g)		acumulada
9,5	0	0	0
6,3	47,77	9,554	9,554
4,8	41,34	8,268	17,822
2,4	81,71	16,342	34,164
1,2	61,21	12,242	46,406
0,6	36,07	7,214	53,620
0,3	27,94	5,588	59,208
0,15	41,59	8,318	67,526
0,1	162,97	32,594	100,120
			fundo
Soma	500,6	100,120	388,420
Módulo de Finura			3,79
Dimensão máxima característica (mm)			9,5 mm

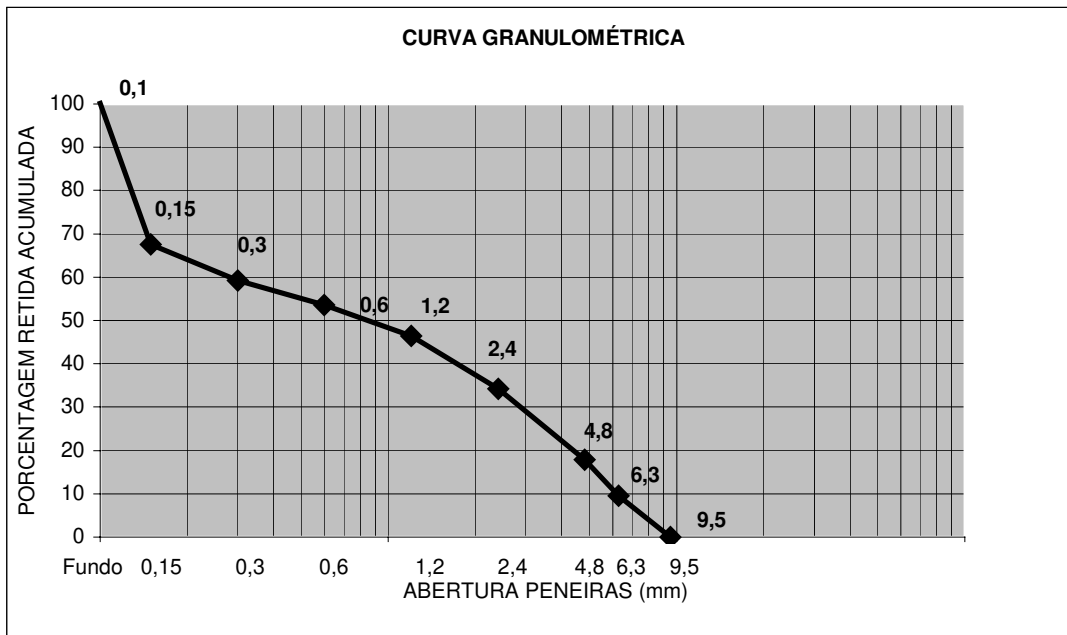


Tabela A4 - Granulometria do agregado graúdo

Material:	Britas 1, 2 e 3
Procedência:	Serra da Babilônia - S.J.B. do Glória
NORMA:	NBR 7217/87
Massa	10 kg

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
38	0	0	0
25	4710	47	47
19	2850	29	76
9,5	1880	19	95
6,3	252	3	97
4,8	85	1	98
2,4	0	0	98
1,2	0	0	98
0,6	0	0	98
0,3	0	0	98
0,15	0	0	98
0	223	2	100 Fundo
Soma	10001	100	1001,83
Módulo de Finura			8,58
Dimensão máxima característica (mm)			38

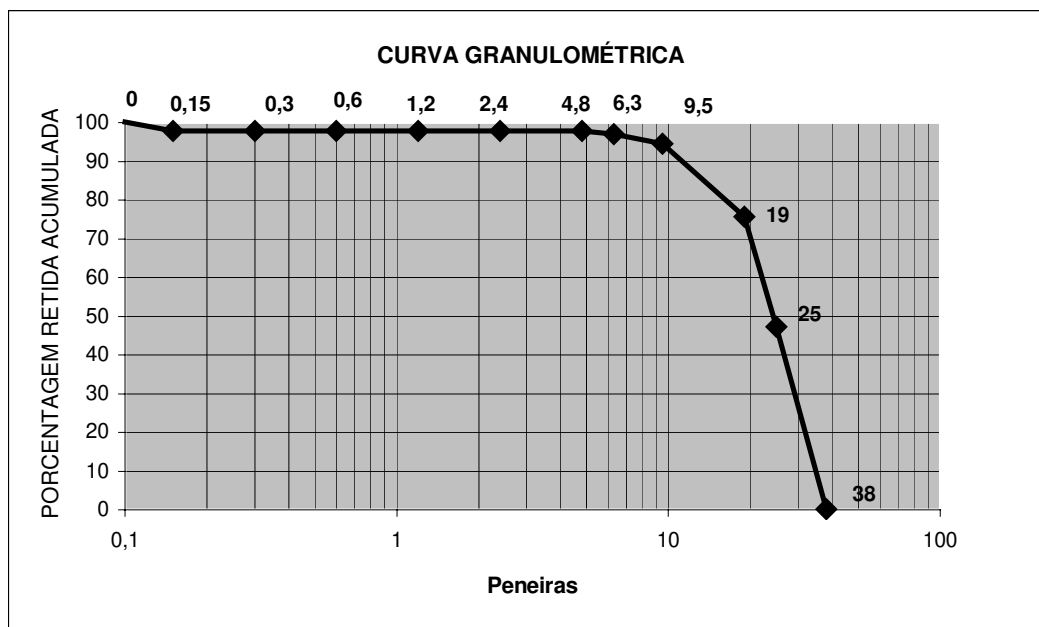


Tabela A5 – Massa unitária, massa específica e absorção de agregados de pedra mineira.

Material	Massa unitária Agregado em estado compactado seco kg/m³ NBR 7810/83	Massa unitária Agregado em estado solto kg/m³ NBR 7251/82	Absorção % NBR 9937/87	Massa específica kg/m³ NBR 9776/87
Brita 2	1.347,45	1.286,85	1,54	-
Pedrisco	-	1.693,10	1,62	2.675,00
Areia	-	1.710,12	-	2.604,00

Notas:

Areia: material passante na peneira de 4,8 mm

Pedrisco: material passante na peneira de 9,5 mm

ANEXO B – Caracterização do Cimento

A descrição técnica do cimento de alto forno CP-III RS – 32 apresentada foi obtida no site www.mizu.com.br/descricao-tecnica.asp.

Descrição Técnica

A fabricação do cimento CP-III RS de classe 32, especialidade da Cimento Mizu, segue as condições registradas no INMETRO, NBR 5735.

Essa norma define o cimento Portland de alto-forno como aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de [clinker Portland](#) e [escória granulada](#) de alto-forno, moídos em conjunto ou em separado.

É permitido, durante a moagem, adicionar uma ou mais formas de sulfato de cálcio ([gesso](#)). Os teores de cada componente do cimento Portland de alto-forno são os seguintes:

Sigla	Classe de Resistência	Clinker + Gesso	Escória	Material Carbonático
CP-III	32	65-25%	70% (máx)	5% (máx.)

Características químicas / prescrições normativas:

- Perda ao fogo:

- Mede-se: a perda de água de cristalização, perda de CO₂.

- Limite: 4,5% (Máx.).

- Resíduo insolúvel:

- Mede-se: impurezas.

- Limite: 1,5% (Máx.).

- Trióxido de enxofre

- Mede-se: dosagem de gesso.

- Limite: 4,0% (Máx.).

Características físicas / prescrições normativas:

- Finura (peneira de malha 0,075mm)

- Mede-se: dimensão dos grãos de cimento.

- Limite: 8,0% (Máx.).

- Início de pega

- Mede-se: o tempo de início de endurecimento é um indicador do efeito da dosagem de gesso no cimento. Esse dado permite avaliar o tempo em que as reações que provocam o início do endurecimento do concreto, devido ao cimento empregado, não são perturbadas pelas operações de transporte, colocação nas formas e adensamento.

- Limite: 1 hora (Mín.).

- Expansibilidade

- Mede-se: a presença anormal de CaO livre e/ou magnésio, em forma de periclásico.

- Limite: 5mm (Máx.).

- Resistência a compressão

- Mede-se: a resistência do cimento sob esforço, nas idades de 3,7 e 28 dias - é uma das características mais importantes.

- Limite: aos 3 dias > 10 Mpa aos 7 dias > 20 Mpa aos 28 dias > 32 Mpa

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 5738/1984 – Moldagem e Cura de Corpos de Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 5739/1994 – Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 6136/1994 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – Especificações.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 7184/1992 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Determinação de resistência à compressão – Método de ensaio.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7211/1983 - Agregados para Concreto.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7217/1987 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7218/1987. Determinação do teor de argila e de materiais friáveis.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7219/1987 – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7222/1994 – Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7223/1992 - Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento de Tronco de Cone.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7251/1982- Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 7810/1983- Agregado em Estado Compactado Seco – Determinação da Massa Unitária.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 8522/1984 - Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama – Tensão-Deformação.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 9937/1987 – Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo.**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 9976/1987 – Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por meio do Frasco Chapman.**

ANDRADE, W. P. et al – EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO – **Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo – Ensaio e Propriedades.** Editora Pini Ltda, São Paulo, 1997.

ANDRIOLO, F. R. **Documentação sobre o Panorama Brasileiro.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relatório Técnico do Simpósio, Goiânia, 1999. p. 9-41.

BAUER, L. A. FALCÃO **Materiais de Construção.** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro, 1979.

DÍAZ, VITERVO O. **Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho.** Ed. Pini, São Paulo, 1997.

FRASCÁ, MARIA H. B. O. **Geologia de Engenharia, Capítulo 2 – Minerais e Rochas.** Ed. ABGE – Associação Brasileira de Geologia e Engenharia, São Paulo, 1998. Editores: Antonio Manoel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito. p. 15-38.

HELENE, P. R. L., e TERZIAM, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** Editora Pini Ltda, São Paulo, 1993.

HOBBS, D. W. **Alkali Silica Reaction in Concrete.** Editora Thomas Telford, London, 1998

JAIN, M. K. e PAL, S. C. **Utilisation of Industrial Slag In Making High Performance Concrete.** In: The Indian Concrete Journal. 1998, vol. 72, nº 6, jun.

KATTAR, J.E. e ALMEIDA N. J. **Cimento Portland.** Publicação Editora Holdercim Brasil S.A., 1997.

LEINZ, VIKTOR e AMARAL, SERGIO E. **Geologia Geral.** Ed. Nacional, São Paulo, 1980.

MARQUES, J. C., TANGO, C. E. S. **Escória de Alto Forno: Estudo Visando seu Emprego no Preparo de Argamassas e Concretos.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – São Paulo - 1994

MEHTA, P. KUMAR e MONTEIRO, PAULO J. **Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais.** Editora Pini, São Paulo, 1994.

NEVILLE, ADAM M. **Propriedades do Concreto.** Ed. Pini, São Paulo, 1997

PAULON, V. A. **Reações Álcali-agregado em Concreto.** 1981. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo,.

PAULON, V. A.; ARMELIN J. L. - **Diagnóstico e Recuperação de Barragem Apresentando Reação Álcali-agregado.** - SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, Goiânia, 1997.

PETRUCCI, ELÁDIO G. R. **Concreto de Cimento Portland .** Ed. Globo, Porto Alegre, 1978

POPP, JOSÉ HENRIQUE **Geologia Geral.** Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1998.

PRUDÊNCIO JR., L. R. et al **Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto.** Editora Gráfica Pallotti, Florianópolis, 2002.

RIPPER, ERNESTO **Manual Prático de Materiais de Construção** Ed. Pini, São Paulo, 1995.

RODRIGUES, JOSÉ C. **Geologia para Engenheiros Civis.** Ed. Mc.Graw-Hill do Brasil, São Paulo, 1978.

SILVA, PAULO FERNANDO A. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana**. Ed. Pini, São Paulo, 1995.

SOUZA, VICENTE C. M. e RIPPER, TOMAZ **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. Ed. Pini, São Paulo, 1998.

TIBA, ROSANA C. **Concremat Engenharia e Tecnologia S.A. — Relatório Final e Projeto de Recuperação da Ponte sobre o Rio Turvo** – RTS 2.3-007/98 - Volume 01/02 - São Paulo – 1998.

VALDUGA, LAILA **Reação Álcali-agregado – Mapeamento de Agregados Reativos do Estado de São Paulo**. 2002. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia Civil – Universidade de Campinas – Campinas.

VERÇOZA, ENIO J. **Materiais de Construção**. Sagra Editora e Distribuidora, Porto Alegre, 1975.

ABSTRACT

Pinheiro, Wania Maria Gonçalves. Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 213 p. Dissertação de Mestrado.

The mineral exploration of the “pedra mineira” at the southwest of the Minas Gerais State, has caused serious environmental problems, because this mineral activity has as characteristic a significative generation of remainder. This volume can reach 80% of the total mineral explored. The objective of this research was to study the influences of this remainder on the mechanical properties of the concrete, determining its technical viability as an alternative agregate instead of the convencional agregates. This alternative could means the solution for the environmental problem as commented above. The method for manufacture of the concretes and the determinations of the mechanicals properties were done based on the ABNT Standard. The results showed that the mechanical resistance of the concrete obtained was $\pm 15\%$ higher or lower than the normal resistance of the convencional concrete. The best results were reached in terms of the resistance when were used 250 until 300 kg of cement per each m^3 of concrete. All these results could to comprove the technical viability of the utilization of the reminder as an agregate to makes concrete and beyond that bringing to the local community a solution for an significant environmental problem.

Key-words: concrete, agregate, remainder, environmental problem.