

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Estruturas

**Propriedades Mecânicas do
Concreto de Alta Resistência
a Baixas Idades**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia de Estruturas

por

Jacqueline Maria Flor

Outubro de 1994

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo experimental das propriedades mecânicas de concretos de alta resistência, fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial, em seis diferentes idades. Foram estudados concretos com resistência à compressão uniaxial, esperada aos 28 dias, de 30, 50, 55 e 60 MPa. Pesquisou-se a evolução e as correlações entre a resistência à compressão uniaxial, o módulo de elasticidade estático secante e a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral. Os resultados indicaram que, os valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração não crescem na mesma proporção que os da resistência à compressão. Adicionalmente, expressões correlacionando o módulo de elasticidade e a resistência à tração com a resistência à compressão foram determinadas. Uma análise comparativa entre essas expressões revelou uma boa correlação com resultados experimentais obtidos por diversos pesquisadores.

Abstract

The results of an experimental investigation of the mechanical properties of high-strength concretes, produced using Type III cement, are presented. Tests were performed on four different concrete mixes, having a 28-day compressive strength of 30, 50, 55 and 60 MPa. Tests results were obtained for ages ranging from 1 to 56 days. The early-age strength development and the relationships between the uniaxial compressive strength, the secant modulus of elasticity and the splitting tensile strength were investigated. Analysis of the test results show that the mechanical properties have different strength developments. Additionally, expressions relating the modulus of elasticity and the splitting tensile strength to the compressive strength were derived. Good correlations were achieved between these relationships and the experimental results found in the literature.

Prefácio

Ao final desta jornada, gostaria de expressar a minha eterna e profunda gratidão e apreço a todos aqueles que colaboraram para a realização deste trabalho:

- Ao Prof. José Márcio Fonseca Calixto, por seu carinho e sua atenção, aliados à sua inquestionável e competente orientação.
- À PRECON INDUSTRIAL S/A, especialmente ao Dr. Milton Vianna Dias, pela receptividade e pelo apoio à nossas idéias, manifestado através do fornecimento dos materiais, equipamentos e pessoal para a realização deste experimento.
- Aos funcionários da PRECON INDUSTRIAL S/A, particularmente ao Eng. Antônio Roberto G. Q. Cabral, ao Técnico Sílvio Xavier Santos, ao Derci, ao Vanildo (“Gordinho”) e ao Edilon, que possibilitaram a realização da parte experimental desta pesquisa, estando ao meu lado durante todo o tempo e se dedicando a transformar estes meses de convívio numa agradável experiência comum.
- Ao Sr. Valdo M. Andrade, representante da Otto Baumgart Indústria e Comércio S/A em Minas Gerais, pela doação do aditivo empregado na fabricação dos concretos.
- Ao Departamento de Materiais e da Construção Civil, pelo providencial empréstimo das formas para a moldagem dos corpos-de-prova.
- Ao Amilton e ao Geraldo, pelo inestimável auxílio nas concretagens e moldagem dos corpos-de-prova.

- Ao Sr. José Athaydes, pela gentil ajuda na fabricação das tiras de madeira para a realização dos ensaios para a determinação da resistência à tração.
- Ao Prof. José Francisco Soares, do Departamento de Estatística, pela orientação na análise estatística dos resultados.
- Ao Prof. Sebastião Salvador Real Pereira, pela colaboração e auxílio na utilização do programa *ANDA - Sistema de Análise de Dados*, de sua autoria.
- Ao Prof. Fernando de Paula Amorim, pela orientação acadêmica.
- Aos coordenadores do curso de mestrado, Alcebiades de Vasconcellos Filho e Estevam Barbosa de Las Casas, e aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas, particularmente à Prof. Elizabeth Vieira Maia e à Fátima, pelo apoio e infra-estrutura oferecidos.
- À Pró-Reitoria de Pesquisa da UFMG, à CAPES e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro.
- À Prof. Maria de Lourdes Mello, pelo valioso auxílio na revisão final do texto.
- Ao Prof. Elvio Mosci Piancastelli, pela sua amizade incondicional, manifestada em todos os seus atos, gestos e palavras de afeto e incentivo.
- Aos meus familiares que, mesmo se privando de tantas horas de convívio, sempre me souberam dar compreensão, carinho e estímulo.

A todos vocês, dedico este trabalho, com a mais profunda admiração e respeito.

Sumário

Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	x
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Definição de Concreto de Alta Resistência	2
1.3 Emprego do Concreto de Alta Resistência	3
1.4 Justificativa do Estudo	5
1.5 Objetivo do Estudo	6
1.6 Escopo do Estudo	7
1.7 Notação	7
2 Revisão Bibliográfica	8
2.1 Introdução	8
2.2 Revisão Bibliográfica	10
3 Materiais e Métodos	28
3.1 Introdução	28
3.2 Materiais	28
3.3 Concretagem e Cura	31
3.4 Metodologia de Ensaio	32
3.4.1 Resistência à Compressão Uniaxial	33
3.4.2 Módulo de Elasticidade Estático Secante	34
3.4.2.1 Ensaio Preliminares	34
3.4.2.2 Ensaio de Determinação do Módulo de Elasticidade	36
3.4.3 Resistência à Tração	41

4	Apresentação dos Resultados	43
4.1	Introdução	43
4.2	Resistência à Compressão Uniaxial	44
4.3	Módulo de Elasticidade Estático Secante	44
4.4	Resistência à Tração	44
5	Análise dos Resultados	49
5.1	Introdução	49
5.2	Evolução das Propriedades Mecânicas	51
5.2.1	Considerações Preliminares	51
5.2.2	Estudo da Evolução das Propriedades Mecânicas	51
5.3	Correlações entre as Propriedades Mecânicas	65
5.3.1	Considerações Preliminares	65
5.3.2	Correlação entre o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão	66
5.3.3	Correlação entre a Resistência à Tração e a Resistência à Compressão	83
6	Conclusões e Recomendações	98
6.1	Introdução	98
6.2	Conclusões	99
6.3	Recomendações	100
	Referências Bibliográficas	103
	Apêndice A - Resultados dos Ensaios de Módulo de Elasticidade	111

Apêndice B - Método dos Mínimos Quadrados	136
B.1 Introdução	137
B.2 Relações entre Variáveis.	137
B.3 Regressão Linear - Ajustamento de uma Linha Reta pelo Método dos Mínimos Quadrados	138
B.4 A Precisão da Estimativa da Equação da Reta da Regressão	141
B.5 Examinando a Equação da Reta da Regressão	145
B.6 Desvio Padrão do Coeficiente Angular b -Intervalo de Confiança para B	146
B.7 Desvio Padrão da Intercepção a - Intervalo de Confiança para A .	147
 Apêndice C - Resultados Experimentais Coletados na Literatura	 150

Lista de Tabelas

3.1	Dados referentes à análise dos cimentos fornecidos pelo fabricante	29
3.2	Dados referentes à análise dos agregados	30
3.3	Dados referentes aos traços empregados	31
3.4	Programa dos ensaios principais	33
3.5	Resultados dos ensaios preliminares	35
4.1	Resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial	45
4.2	Resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático secante segundo a norma brasileira	46
4.3	Resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático secante segundo a norma americana.	47
4.4	Resultados obtidos para a resistência à tração, determinada pelo método da compressão diametral	48
5.1	Relação entre o valor do módulo de elasticidade calculado segundo a norma americana e o valor do módulo de elasticidade calculado segundo a norma brasileira	50
5.2	Resultados obtidos para a resistência à compressão (% 28 dias)	52
5.3	Resultados obtidos para o módulo de elasticidade (% 28 dias)	55
5.4	Resultados obtidos para a resistência à tração (% 28 dias)	58
5.5	Tabela geral dos resultados da resistência à compressão e do módulo de elasticidade	67
5.6	Parâmetros estatísticos associados aos modelos que relacionam o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, para cada traço	68
5.7	Limites superior e inferior dos interceptos e dos coeficientes angulares do modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$, para cada traço	74
5.8	Parâmetros estatísticos associados ao modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$, quando aplicado a todos os dados	76

5.9	Tabela geral dos resultados obtidos na análise comparativa entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e os valores previstos por algumas equações	80
5.10	Tabela geral dos resultados da resistência à compressão e da resistência à tração	84
5.11	Parâmetros estatísticos associados aos modelos que relacionam a resistência à tração e a resistência à compressão, para cada traço	85
5.12	Limites superior e inferior dos interceptos e dos coeficientes angulares do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$, para cada traço	90
5.13	Parâmetros estatísticos associados ao modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$, quando aplicado a todos os dados	92
5.14	Tabela geral dos resultados obtidos na análise comparativa entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente e os valores previstos por algumas equações	96
A.1	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 1 dia	112
A.2	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 3 dias	113
A.3	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 7 dias	114
A.4	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 14 dias	115
A.5	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 28 dias	116
A.6	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 56 dias	117
A.7	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 1 dia	118
A.8	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 3 dias	119
A.9	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 7 dias	120
A.10	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 14 dias	121
A.11	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 28 dias	122

A.12	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 56 dias	123
A.13	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 1 dia	124
A.14	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 3 dias	125
A.15	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 7 dias	126
A.16	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 14 dias	127
A.17	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 28 dias	128
A.18	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 56 dias	129
A.19	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 1 dia	130
A.20	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 3 dias	131
A.21	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 7 dias	132
A.22	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 14 dias	133
A.23	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 28 dias	134
A.24	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 56 dias	135
B.1	Tabela de análise de variância	144
B.2	Valores dos percentis da distribuição t de Student com GL graus de liberdade	149
C.1	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Lew e Reichard [20] e os valores previstos por algumas equações	151
C.2	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Nilson e Slate [10] e os valores previstos por algumas equações	152

C.3	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Carrasquillo [10] e os valores previstos por algumas equações	153
C.4	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih <i>et alli</i> [27] e os valores previstos por algumas equações	155
C.5	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Oluokun [31] e os valores previstos por algumas equações	162
C.6	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente no presente estudo e os valores previstos por algumas equações	164
C.7	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente por Gardner e Poon [19] e os valores previstos por algumas equações	166
C.8	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente por Lew e Reichard [20] e os valores previstos por algumas equações	167
C.9	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente por Carrasquillo [10] e os valores previstos por algumas equações	168
C.10	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente por Macedo <i>et alli</i> [26] e os valores previstos por algumas equações	169
C.11	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente por Gardner [29] e os valores previstos por algumas equações	170
C.12	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente por Oluokun [31] e os valores previstos por algumas equações	172
C.13	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente no presente estudo e os valores previstos por algumas equações	173

Lista de Figuras

3.1	Plano de carga efetuado na determinação do módulo de elasticidade	37
3.2	Montagem para a execução do ensaio do módulo de elasticidade	38
3.3	Montagem para a calibração dos transdutores	38
3.4	Módulo de elasticidade estático secante segundo a norma brasileira	40
3.5	Módulo de elasticidade estático secante segundo a norma americana	41
3.6	Montagem para a execução do ensaio de compressão diametral	42
5.1	Resistência à compressão x idade	51
5.2	Resistência à compressão (%28 dias) x idade	52
5.3	Módulo de elasticidade x idade	54
5.4	Módulo de elasticidade (%28 dias) x idade.	55
5.5	Resistência à tração x idade	57
5.6	Resistência à tração (%28 dias) x idade	58
5.7	Propriedades mecânicas do traço A (% 28 dias) x idade	62
5.8	Propriedades mecânicas do traço B (% 28 dias) x idade	62
5.9	Propriedades mecânicas do traço C (% 28 dias) x idade	63
5.10	Propriedades mecânicas do traço D (% 28 dias) x idade	63
5.11	Módulo de elasticidade x resistência à compressão - Traço A (30 MPa)	69
5.12	Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço A (30 MPa)	69
5.13	Módulo de elasticidade x resistência à compressão - Traço B (50 MPa).	70
5.14	Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço B (50 MPa).	70
5.15	Módulo de elasticidade x resistência à compressão - Traço C (55 MPa).	71
5.16	Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço C (55 MPa).	71

5.17	Módulo de elasticidade x resistência à compressão - Traço D (60 MPa)	72
5.18	Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço D (60 MPa)	72
5.19	Intervalos de confiança dos interceptos do modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$	75
5.20	Intervalos de confiança dos coeficientes angulares do modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$	75
5.21	Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à compressão - (Todos os traços)	77
5.22	Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente os valores previstos por algumas equações	81
5.23	Resistência à tração x resistência à compressão - Traço A (30 MPa)	86
5.24	Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço A (30 MPa)	86
5.25	Resistência à tração x resistência à compressão - Traço B (50 MPa).	87
5.26	Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço B (50 MPa).	87
5.27	Resistência à tração x resistência à compressão - Traço C (55 MPa).	88
5.28	Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço C (55 MPa).	88
5.29	Resistência à tração x resistência à compressão - Traço D (60 MPa)	89
5.30	Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão - Traço D (60 MPa)	89
5.31	Intervalos de confiança dos interceptos do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$	91
5.32	Intervalos de confiança dos coeficientes angulares do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$	91
5.33	Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão - (Todos os traços)	93
5.34	Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente os valores previstos por algumas equações	95

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

Nos últimos 20 anos, tem-se observado um crescente interesse pelo emprego de concretos de resistências mais elevadas. Tais concretos podem ser produzidos de maneira prática e econômica, utilizando cimento, areia e brita comuns, porém, mais cuidadosamente selecionados, conjuntamente com uma relação água/cimento bem reduzida e um cuidadoso controle de qualidade no processo de produção. A trabalhabilidade necessária é obtida por aditivos redutores de água de alta eficiência, denominados superplastificantes. Adições minerais como a microssilica e a cinza volante são comumente utilizadas, substituindo-se, parcialmente, o cimento.

Uma vez que a produção dos concretos de alta resistência não requer o emprego de materiais exóticos nem de processos especiais, sua fabricação está ao alcance de qualquer produtor de concreto pré-misturado que disponha de materiais, meios de produção e controle de qualidade conforme é exigido pelas normas. Um conhecimento mais aprofundado das propriedades físicas e do comportamento de elementos estruturais fabricados com concretos de alta resistência permitirá, não somente expandir a sua utilização como material de construção, mas também, empregá-lo com maior confiança, o que resultará em projetos mais seguros e econômicos.

1.2 Definição de Concreto de Alta Resistência

O termo “concreto de alta resistência” não possui uma definição única, podendo referir-se a diferentes faixas de resistências. Em geral, são considerados concretos de alta resistência, aqueles que apresentam resistências à compressão simples acima das usuais, em um dado local e época. Por exemplo, em obras convencionais de edificações no Brasil, nas quais as resistências normalmente não ultrapassam 20 MPa, concretos com resistências acima de 30 MPa já podem ser considerados de alta resistência. Nos EUA e Europa, onde já existe uma certa tradição na produção de concretos com resistência mais elevada, considera-se normalmente concretos de alta resistência os que possuem resistência à compressão maior que 40 MPa.

Em 1979, foi criado, pelo American Concrete Institute (ACI), o Comitê 363, ao qual foi atribuído a missão de coletar, analisar e publicar informações sobre concretos de alta resistência. O primeiro documento elaborado por este comitê foi um relatório sobre o estado-da-arte do concreto de alta resistência, publicado em 1984 [1]. Uma versão mais atualizada deste relatório foi publicada em 1992 [2]. De acordo com o Comitê 363, o termo “concreto de alta resistência” aplica-se aos concretos que possuem resistência à compressão especificada para projeto superior a 41 MPa, excluindo-se aqueles produzidos com técnicas e materiais exóticos.

O crescente interesse pelos concretos de alta resistência fez com que o Comité Euro-International du Béton (CEB) e a Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) criassem, também, em 1988, um grupo de trabalho, cujo primeiro objetivo foi elaborar um relatório sobre o estado-da-arte deste novo material. Tal relatório foi apresentado no XI Congresso da FIP, em 1990 [3]. Nele, o termo “concreto de alta resistência” refere-se a todos os concretos com resistência à compressão, medida em corpos-de-prova cilíndricos, superiores a 60 MPa.

Os concretos de alta resistência apresentam, além da resistência à compressão mais elevada, características importantes que merecem ser mencionadas. Em geral, um aumento na resistência à compressão simples está relacionado a uma melhoria das demais propriedades técnicas, sejam elas físicas ou reológicas. Amaral Filho, em seu mais recente trabalho sobre concretos de alta

resistência, publicado em 1992 [4], relacionou as seguintes propriedades especiais: baixa permeabilidade, alta resistência aos ataques de cloretos e sulfatos, alta resistência à abrasão, ótima aderência a um concreto velho, maior aderência concreto-aço, altas resistências mecânicas a baixas idades, baixa segregação e ausência de exudação.

Tendo em vista o exposto acima, acredita-se que a expressão “concreto de alto desempenho” seria mais apropriada para se referir a tais concretos, ao invés da restritiva denominação “concreto de alta resistência”. Porém, devido ao fato de que, na literatura pesquisada, é sempre atribuída a expressão “concreto de alta resistência” aos concretos que apresentam resistência à compressão mais elevada, optou-se por manter, no presente trabalho, ao se fazer menção a esses concretos, a mesma denominação.

Portanto, no presente estudo, o termo “concreto de alta resistência” refere-se a concretos de peso específico normal, produzidos utilizando-se materiais e técnicas convencionais, e com resistência à compressão simples igual ou superior a 50 MPa, na idade de 28 dias.

1.3 Emprego do Concreto de Alta Resistência

As vantagens do emprego de concretos de alta resistência em estruturas decorrem das propriedades por eles apresentadas.

Em edifícios altos, o uso de concretos de alta resistência viabiliza pilares de menores dimensões, aumentando, assim, o espaço útil dos diversos pavimentos, principalmente nos andares inferiores, cujos pilares recebem cargas consideráveis. Esta aplicação tem sido largamente explorada em todo mundo, especialmente nos EUA. Desde a década de 70, várias edificações vêm sendo executadas na área de Chicago, e têm sido empregados concretos de alta resistência. Obras como o Mid-Continental Plaza Building e o Water Tower Place Building, construídas em 1972 e 1975, respectivamente, são citadas em ambos os relatórios sobre o estado-da-arte do concreto de alta resistência mencionados anteriormente. Em Nova York, a construção do Helmsley Palace Hotel, em 1978, utilizou concreto com resistência à compressão especificada, em projeto, de 57 MPa. No Brasil, tanto Pinto e Rochlitz, em 1977 [5], como Ferraz,

em 1988 [6], exemplificaram, em seus trabalhos, o Edifício Trianon - Museu de Arte de São Paulo (MASP), construído em 1967, no qual foi especificado um concreto com tensão mínima de ruptura à compressão na idade de 28 dias de 45 MPa, ou seja, um valor cerca de três vezes superior ao usado, ainda hoje, em obras comuns.

A viabilidade econômica da execução de uma estrutura com concreto de alta resistência foi estudada por Ahmad e Shah, em 1985 [7], para uma edificação de 79 andares e que abrangia uma área de 28,6 m x 67 m, similar ao Water Tower Place, em Chicago. Os custos totais da construção das colunas, utilizando-se concretos com resistência à compressão de até 84 MPa foram comparados àqueles onde se empregou apenas um concreto com resistência à compressão de 28 MPa. Utilizando concreto de alta resistência, os 19 primeiros andares foram dimensionados para uma resistência à compressão de 84 MPa; os 31 andares intermediários foram projetados para 63 MPa e os 29 andares restantes, para 28 MPa. Para obter-se uma estrutura com concreto de resistência normal, os 79 andares foram dimensionados para uma resistência à compressão de 28 MPa. Foram computados os custos totais do concreto, do aço e das formas para cada alternativa de projeto. A opção na qual empregou-se o concreto de alta resistência apresentou uma economia de quase 50% nos custos dos pilares, quando comparados com os custos calculados para a opção com concreto 28 MPa. Esse valor ainda não incluiu os ganhos relativos às maiores áreas rentáveis devidas aos pilares de menores dimensões. Observou-se, então, uma tendência clara de redução dos custos com o aumento da resistência do concreto.

Em pontes, a combinação do uso do concreto de alta resistência para reduzir o peso-próprio e a protensão para controlar as flechas permite vencer maiores vãos. Recentes exemplos de pontes nas quais foi especificado o uso de concreto de alta resistência são citados nos relatórios do Comitê 363 do ACI [2] e do CEB-FIP [3] e incluem Huntington (West Virginia) to Proctorville (Ohio) Bridge, nos EUA, e Akkagawa Railway Bridge, no Japão.

Uma outra aplicação importante do concreto de alta resistência tem sido nas estruturas off-shore para petróleo não apenas para conseguir maiores resistências e reduzir o peso-próprio, mas também para melhorar a durabilidade. Eles vêm sendo empregados em todas as estruturas off-shore do Mar do Norte desde a década de 70. As plataformas Ekofisk, na Suécia, e Gullfaks C, na

Noruega, são exemplos notáveis mencionados no relatório sobre o estado-da-arte do concreto de alta resistência do CEB-FIP [3].

O concreto de alta resistência, também vem sendo largamente utilizado na indústria de pré-moldados. O fato de se conseguir, facilmente, grandes resistências permite fabricar peças mais leves e vencer vãos maiores. Em peças em contato com meios agressivos como estacas e paredes diafragmas, a sua durabilidade é incomparavelmente maior. No âmbito nacional, cabe aqui exemplificar o emprego de anéis pré-moldados nas obras metroviárias da Cia. do Metropolitano de São Paulo desde 1989 [47].

1.4 Justificativa do Estudo

Recentemente, a indústria da construção civil vem sofrendo uma pressão maior no sentido de reduzir os seus cronogramas. Esta redução dos prazos de construção, ocasionada pela necessidade da utilização rápida das estruturas e pela redução dos custos das obras, inevitavelmente, acarreta a aplicação de carregamentos nos elementos estruturais em idades inferiores a 28 dias. Contudo, nestas idades, as propriedades do concreto não se desenvolveram totalmente. Portanto, uma reavaliação dos métodos de ensaio para determinação das propriedades e dos procedimentos de cálculo empregados no projeto, bem como uma adaptação dos processos construtivos se fazem necessárias, para atender a esta nova realidade da construção civil.

Pesquisas estatísticas, citadas por Kaminetzky e Stivaros num trabalho apresentado em 1994 [8], apontam que a ruptura ou o colapso total de uma estrutura de concreto ocorre com mais frequência durante a sua construção do que durante a sua vida útil. Os autores também mencionaram alguns recentes registros de colapsos de estruturas de concreto durante a construção, os quais revelaram o perigo de se aplicar carregamentos significativos nos elementos estruturais de concretos que não atingiram a maturidade, ou seja, a idade de 28 dias. Embora as causas específicas que provocaram tais colapsos tenham sido diferentes, algumas podem ser apontadas como principais: a falta, a inadequação ou a retirada prematura dos escoramentos necessários para suportar a estrutura e a ruptura de um elemento estrutural causada ou por um carregamento maior que o

previsto ou por valores relativamente pequenos das propriedades físicas do concreto.

Estudos experimentais e teóricos como o realizado por Fu e Gardner, em 1986 [9], objetivaram investigar os efeitos adversos causados quando elementos estruturais de concreto são submetidos a carregamentos excessivos a baixas idades. Em geral, tais estudos revelaram que esforços de flexão em concretos que não atingiram a maturidade provocaram maiores fissuras, maiores deflexões a médio e longo prazo e alguns outros problemas associados à durabilidade da estrutura. Portanto, para se assegurar um bom desempenho e a integridade estrutural de uma obra durante a sua fase de construção e, conseqüentemente, durante a sua vida útil, faz-se necessário o conhecimento da evolução das propriedades físicas do concreto e do comportamento dos seus elementos estruturais, quando submetidos a carregamentos prematuros. Igualmente importante é o conhecimento prévio da magnitude das cargas aplicadas às peças estruturais oriundas de cada etapa da construção de modo a evitar problemas causados por esforços adicionais impostos, tais como novas concretagens e/ou retirada de escoramentos.

1.5 Objetivo do Estudo

O principal objetivo do presente estudo é investigar as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência, fabricados com cimento de alta resistência inicial, a baixas idades, ou seja, desde a sua fabricação até a idade de 56 dias. São estudados concretos de peso específico normal fabricados com materiais e técnicas convencionais, apresentando resistência à compressão simples esperada aos 28 dias compreendida na faixa entre 30 MPa e 60 MPa. As propriedades investigadas são a resistência à compressão simples, o módulo de elasticidade estático secante e a resistência à tração determinada pelo ensaio de compressão diametral.

1.6 Escopo do Estudo

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica dos estudos sobre as propriedades mecânicas de concretos, com enfoque especial para as idades inferiores a 28 dias. O Capítulo 3 refere-se à descrição do procedimento experimental empregado na fabricação dos concretos, moldagem dos corpos-de-prova e execução dos ensaios. Os resultados deste estudo encontram-se apresentados no Capítulo 4, enquanto o Capítulo 5 refere-se à análise e discussão dos mesmos. Neste capítulo, são também avaliadas as correlações entre as propriedades mecânicas investigadas. Conclusões e recomendações para pesquisas futuras são apresentadas no Capítulo 6.

1.7 Notação

Quando não for especificado, a seguinte notação será empregada nos diversos capítulos deste trabalho:

w = peso específico do concreto, em kg/m^3 ;

f_c = resistência à compressão uniaxial;

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão;

E_{co} = módulo de elasticidade estático tangente na origem do diagrama tensão-deformação;

E_c = módulo de elasticidade estático secante, correspondente a 40% da resistência à compressão;

f_t = resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral; e

f_{tk} = resistência característica do concreto à tração.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Curiosamente, a utilização inicial de concretos com resistências maiores que as usuais em estruturas de grande porte, antecedeu ao completo entendimento das suas propriedades técnicas como material e ao conhecimento do comportamento estrutural dos elementos em que era aplicado. Nos tempos atuais, persiste, ainda, uma tendência de se preocupar, exclusivamente, com a resistência à compressão, assumindo que, se a resistência à compressão é maior, conseqüentemente, as demais propriedades serão, semelhantemente, maiores. De uma maneira geral, isto é, de fato, verdadeiro, mas nem sempre esse ganho se dá na mesma proporção que o ganho na resistência à compressão.

Adicionalmente, boa parte das normas de projeto, pelas quais peças estruturais de concreto como lajes, vigas e pilares são dimensionadas, está baseada em resultados de ensaios de corpos-de-prova nos quais a resistência à compressão não ultrapassa 40 MPa. Portanto, a utilização das equações dessas normas para dimensionamento de peças, cujos concretos apresentam resistências bem maiores, pode levar a cálculos até mesmo contra a segurança.

Preocupações com estas questões levaram vários centros a realizarem programas de pesquisas, destinados a gerar informações sobre concretos de alta resistência. De uma maneira geral e sucinta, tais pesquisas objetivaram:

- (1) estudar a natureza fundamental do material e estabelecer em que aspectos ele é igual e, em quais é diferente dos concretos tradicionais, ou seja, diferenciar os métodos para a sua produção, incluindo a seleção, a dosagem e a mistura dos materiais, o transporte e o lançamento do concreto fresco e os processos de cura;
- (2) estabelecer as suas propriedades estruturais como material de construção tais como, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de fluência, entre outras; e
- (3) estudar o comportamento de elementos estruturais de concreto armado e protendido, fabricados com concreto de alta resistência.

A título de exemplificação, pode-se citar Cornell University, Ithaca, EUA, que, desde 1976, vem realizando uma extensa pesquisa com concretos de resistência à compressão, compreendida entre 41 e 83 MPa. Resultados desta pesquisa vêm sendo publicados ao longo dos últimos anos e têm sido de fundamental importância como referência, no que diz respeito a concretos de alta resistência, para revisões de normas de projeto de estruturas em concreto armado e protendido [10] [11] [12]. Outros centros de pesquisa na área de concretos de alta resistência são da University of Texas at Austin, EUA; Université de Sherbrooke, Québec, Canadá; e Centre Experimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, França. Intensivos estudos também vêm sendo realizados na Noruega, principalmente com relação às estruturas off-shore de concreto.

O objetivo principal deste capítulo é apresentar uma breve revisão dos trabalhos mais relevantes, relacionados às propriedades mecânicas dos concretos de resistência normal e de alta resistência, especialmente a baixas idades. Algumas correlações entre as propriedades dos concretos propostas por diversos autores e aquelas especificadas em algumas normas serão também apresentadas e servirão como referência para a análise e discussão dos resultados do presente trabalho. Essa revisão bibliográfica será apresentada na ordem cronológica, objetivando-se, desta maneira, estabelecer a sequência do pensamento e da evolução do mesmo.

2.2 Revisão Bibliográfica

Em 1934, Thoman e Raeder [13] estudaram a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de concretos com resistências à compressão variando entre 14 e 76 MPa, nas idades de 7, 28 e 90 dias. Esses concretos foram fabricados com cimento Portland comum e diferentes agregados graúdos como: cascalho, basalto e dois tipos de arenito. O módulo de elasticidade foi determinado como sendo a inclinação da reta tangente à curva tensão-deformação, obtida do ensaio de compressão uniaxial, a 25% da tensão máxima. Thoman e Raeder observaram que as curvas tensão-deformação dos concretos de resistências mais elevadas apresentaram uma porção ascendente mais linear e de inclinação maior quando comparadas com as curvas para resistências menores.

No ano de 1960, Pawn [14], coletando dados de diversos pesquisadores, estudou o módulo de elasticidade estático de concretos fabricados com uma grande variedade de agregados (normais e leves) e com resistência à compressão variando entre 14 e 41 MPa. Informações a respeito do tipo de cimento empregado na fabricação dos concretos não foram apresentadas pelo autor. Foi observado que, para uma determinada resistência, o módulo de elasticidade de concretos fabricados com agregados leves era consideravelmente inferior aos valores apresentados por concretos fabricados com agregados normais, ou seja, os resultados indicaram que o módulo de elasticidade do concreto era uma função não apenas da resistência à compressão, mas também do seu peso específico. Pawn sugeriu, então, a seguinte expressão para se determinar o módulo de elasticidade a qual, posteriormente, seria adotada pela norma americana *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318/89) [15]:

$$E_c = 0,0427 w^{3/2} \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.1)$$

para $14 \text{ MPa} < f_c < 41 \text{ MPa}$

Resultados de uma pesquisa sobre concretos de alta resistência, realizada pela Cement and Concrete Association, Londres, Inglaterra, foram apresentados por Parrot, em 1969 [16] [17] [18]. Baseando-se nos dados obtidos numa primeira etapa desta pesquisa, Parrot selecionou os materiais e determinou os traços necessários para se produzir concretos com resistência à compressão acima de 80 MPa na idade de 28 dias, medida em corpos-de-prova cúbicos de

100 mm. A etapa seguinte caracterizou-se pelo estudo das propriedades mecânicas destes concretos. Nesta fase foram empregados, para a fabricação dos concretos de alta resistência, cimento Portland comum, 3 tipos de agregados graúdo (calcário, dolerito e basalto), relação agregados/cimento igual a 2,0, sendo 10% de agregado fino, e fator água/cimento igual a 0,28. Concretos com resistência à compressão igual a 36 e 41 MPa, medida em cubos de 100 mm, na idade de 28 dias, foram também igualmente estudados. A resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade foram investigados. A resistência à tração foi avaliada, tanto pelo ensaio de flexão, como também, pelo ensaio de compressão diametral, utilizando vigas de 100 mm x 100 mm x 500 mm e cilindros de 150 mm x 300 mm, respectivamente. O módulo de elasticidade estático foi determinado a partir de leituras iniciais de deformações em corpos-de-prova prismáticos de 60 mm x 95 mm x 500 mm, ensaiados para a determinação do coeficiente de fluência. Parrot chegou às seguintes conclusões:

- (1) A relação da resistência à compressão entre as idades de 7 e 28 dias ficou na faixa de 0,8 a 0,9, para concretos de alta resistência, e 0,7 a 0,75, para concretos de resistência normal.
- (2) A relação da resistência à tração, avaliada tanto pelo ensaio de flexão como pelo ensaio de compressão diametral entre as idades de 7 e 28 dias, foi, em média, igual a 0,9 e 0,8, para concretos de alta resistência e para concretos de resistência normal, respectivamente.
- (3) A resistência à tração, medida pelo ensaio de compressão diametral, apresentou valores entre 5 e 7% dos resultados obtidos para a resistência à compressão.
- (4) Quando comparados com os resultados obtidos para os concretos de resistência normal, os concretos de alta resistência apresentaram valores da resistência à tração, obtidos pelo ensaio de compressão diametral, 50 a 110% maiores.
- (5) O módulo de elasticidade estático apresentou valores cerca de 15 a 20% maiores para concretos de alta resistência, quando comparados com os valores obtidos para os concretos de resistência normal.

Em 1976, Gardner e Poon [19] estudaram a evolução e as correlações entre a resistência à compressão simples, a resistência à tração por compressão diametral e a aderência de concretos fabricados com cimento Portland comum e cimento de alta resistência inicial. As resistências à compressão e à tração foram avaliadas em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm. Todos os concretos foram dosados para uma resistência de 28 MPa e fator água/cimento de aproximadamente 0,5. Um total de 6 séries de corpos-de-prova foram ensaiadas: 3 correspondendo aos concretos com cimento Portland comum e as outras 3, aos concretos com cimento de alta resistência inicial. Após a moldagem, os corpos-de-prova de cada série foram divididos em 3 grupos e cada grupo foi submetido a um período inicial de cura, à temperatura de 22° C. O primeiro grupo permaneceu durante 1 dia, o segundo grupo permaneceu durante 3 dias e o último grupo permaneceu durante 7 dias, à temperatura de 22° C. Transcorridos estes períodos iniciais de cura, cada grupo de corpos-de-prova foi transferido para ambientes a temperaturas de 22° C, 13° C e 2° C até a idade do ensaio. Para cada tipo de teste, foram ensaiados 5 corpos-de-prova nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 dias e 3 meses. Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- (1) A resistência à compressão, a resistência à tração e a aderência estão relacionadas entre si, e o aumento de uma reflete, similarmente, nas demais.
- (2) A temperatura de cura influencia a evolução da resistência à tração e a aderência, da mesma maneira que influencia a evolução da resistência à compressão.
- (3) A resistência à compressão, a resistência à tração e a aderência do concreto a baixas idades aumentam com o aumento da temperatura de cura.
- (4) A resistência à tração e a aderência são proporcionais à resistência à compressão elevada à potência 0,8, independentemente da idade. Nem as baixas temperaturas de cura, nem o tipo de cimento empregado mostraram qualquer efeito significativo nesta correlação.

Lew e Reichard [20], em 1978, investigaram a evolução e a correlação das propriedades mecânicas de concretos fabricados com cimento Portland

comum e brita calcária. Ensaio de compressão simples e de compressão diametral foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm, sob 3 diferentes temperaturas de cura: 2° C, 13° C e 23° C, nas idades de 1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28 e 42 dias. Foram igualmente determinados os módulos de elasticidade secante, através das curvas tensão-deformação, tomados a 40% da tensão máxima. Os resultados obtidos para a resistência à compressão simples variaram entre 7 e 25 MPa, para a resistência à tração, entre 0,8 e 3 MPa e, finalmente, para o módulo de elasticidade, entre 10 e 31 GPa. Uma análise estatística dos resultados mostrou que, não só a resistência à compressão simples, mas também, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade podem ser relacionados à maturidade, expressa em termos da idade e da temperatura de cura. Para os concretos curados a 23° C, os autores concluíram, também, que, a baixas idades, a taxa de crescimento da resistência à tração é aproximadamente a mesma da resistência à compressão enquanto que, a taxa de crescimento do módulo de elasticidade é ligeiramente maior que a da resistência à compressão.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) substituiu, em 1980, a norma NB-1/60 pela NBR 6118/80 (NB-1/78) [21]. Esta norma fixa as condições gerais de projeto, execução e controle de obras de concreto armado. Na falta de determinação experimental, essa norma recomenda o emprego da seguinte expressão para se prever o valor do módulo de deformação longitudinal à compressão, na origem da curva tensão-deformação:

$$E_{co} = 6600 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.2)$$

Para o módulo de elasticidade secante, a NBR 6118/80 recomenda tomar o seu valor como sendo 90% daquele especificado pela equação (2.2), ou seja:

$$E_c = 0,9 \times 6600 \sqrt{f_c} = 5940 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.3)$$

Para o valor característico da resistência do concreto à tração, a NBR 6118/80 permite a adoção, na falta de determinação experimental, das seguintes relações:

$$f_{tk} = \frac{f_{ck}}{10}, f_{ck} \leq 18 \text{ MPa} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.4a)$$

$$f_{tk} = 0,06 f_{ck} + 0,7, f_{ck} > 18 \text{ MPa} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.4b)$$

Carrasquillo [10], em 1980, apresentou os resultados de uma pesquisa sobre as propriedades mecânicas de concretos fabricados com cimento Portland comum e dois diferentes tipos de agregados graúdos: cascalho e brita calcária. Concretos com 3 faixas distintas de resistência à compressão na idade de 56 dias foram estudados: concretos de alta resistência, com resistência à compressão não inferior a 62 MPa; concretos de resistência média, com resistência à compressão entre 41 e 62 MPa e, finalmente, concretos de resistência normal, com resistência à compressão entre 21 e 41 MPa. Os concretos apresentaram pesos específicos entre 2320 e 2420 kg/m³. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28 e 95 dias. Corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm e de 150 mm x 300 mm foram moldados para os ensaios de compressão simples. Cilindros de 100 mm x 200 mm e vigas de 100 mm x 100 mm x 355 mm foram utilizados nos ensaios para a determinação da resistência à tração por compressão diametral e por flexão, respectivamente. As curvas tensão-deformação e o módulo de elasticidade foram determinados em cilindros de 100 mm x 200 mm. Todos os corpos-de-prova foram curados à temperatura de aproximadamente 24° C e a 95 a 100% de umidade relativa até a idade dos testes. O autor concluiu que:

- (1) A baixas idades, os concretos de alta resistência apresentaram uma taxa de crescimento da resistência à compressão, maior que os concretos de resistências menores. Nas idades mais avançadas, ou seja, idades acima de 28 dias, estas diferenças foram desprezíveis. A relação da resistência à compressão entre as idades de 7 e 95 dias foi igual a 0,60 para os concretos de resistência normal, 0,65 para os concretos de resistência média e 0,73 para os concretos de alta resistência.
- (2) A relação entre as resistências à compressão de corpos-de-prova cilíndricos 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm ficou entre 0,88 e 0,90, independentemente da resistência à compressão e da idade de teste.

- (3) A forma da curva tensão-deformação está diretamente relacionada ao mecanismo de formação e propagação da microfissuração interna. Nos concretos de alta resistência, o número total e o comprimento das microfissuras são menores e, por esta razão, as curvas tensão-deformação dos concretos de alta resistência apresentaram uma porção ascendente com maior coeficiente angular e limite de proporcionalidade mais elevado quando comparadas às curvas dos concretos de resistências menores.
- (4) As deformações associadas à tensão máxima foram maiores para os concretos de alta e média resistência que para os concretos de resistência normal. De uma maneira geral, estas deformações foram maiores para os concretos fabricados com cascalho que para os fabricados com brita calcária.
- (5) Os concretos de alta resistência apresentaram uma ruptura mais explosiva e menor ductilidade, dificultando a obtenção da porção descendente da curva.
- (6) A equação da norma americana *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318/89) [15] para a determinação do módulo de elasticidade, substancialmente, superestima os valores experimentais obtidos para concretos com resistência à compressão superior a 41 MPa. Para concretos de peso específico normal, a seguinte equação é recomendada para se estimar o módulo de elasticidade:
- $$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \quad (\text{em MPa}) \quad (2.5)$$
- para $21 \text{ MPa} < f_c < 83 \text{ MPa}$
- (7) O coeficiente de Poisson é aproximadamente igual a 0,20, independentemente da resistência à compressão e a idade de teste.
- (8) A resistência à tração determinada pelo ensaio de compressão diametral, pode ser estimada pela equação:

$$f_t = 0,59 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.6)$$

para $21 \text{ MPa} < f_c < 83 \text{ MPa}$

Em 1982, Carino e Lew [22] coletaram dados no National Bureau of Standards, EUA, e, juntamente com os resultados apresentados por Gardner e Poon, em 1976 [19], realizaram um estudo estatístico para reavaliar a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão de concretos de peso específico normal. As resistências à compressão simples variaram entre 7 e 40 MPa, enquanto que as resistências à tração variaram entre 0,8 e 4 MPa. Segundo os autores, o estudo mostrou, claramente, que a proporcionalidade adotada entre a resistência à tração por compressão diametral e a raiz quadrada da resistência à compressão simples não é a relação mais precisa, quando se trabalha com uma faixa de resistência à compressão mais abrangente. A relação baseada na raiz quadrada da resistência à compressão simples foi, originalmente, formulada com base em resultados de testes em concretos na idade de 28 dias, com resistências geralmente superiores a 17 MPa. Para resistências mais baixas, a atual fórmula da norma americana *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318/89) [15] superestima a resistência à tração enquanto que, para resistências à compressão bem mais elevadas, a resistência à tração é subestimada. Por isso, os autores sugeriram a seguinte expressão para avaliar a resistência à tração por compressão diametral, sendo conhecida a resistência à compressão simples:

$$f_t = 0,26 (f_c)^{0,73} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.7)$$

Carino e Lew ressaltaram que as relações propostas pelos idealizadores do ensaio de compressão diametral indicam que a resistência à tração é também proporcional à resistência à compressão elevada à potência 0,73. As equações propostas mostraram-se bastante complicadas e, por esta razão, não foram adotadas pelas normas americanas de projeto daquela época.

Já em 1985, Date e Schnormeier [23], a partir de dados coletados de projetos realizados na cidade de Phoenix, EUA, desde 1981, apresentaram relações empíricas relativamente simples, para se prever a resistência à compressão simples a 28 dias, com base nos resultados de resistências nas idades de 7 e 14 dias. O uso de tais relações permitiriam ao engenheiro tomar decisões quanto à aceitação do concreto em idades mais baixas, baseando-se em critérios

de aceitação previamente definidos, resultando em economia de tempo e, conseqüentemente, em redução de custos. Os autores alertaram para o fato de que, uma vez que as propriedades dos concretos variam conforme os materiais empregados, novas pesquisas deveriam ser realizadas, para se confirmar a validade e a aplicabilidade destas relações em outras regiões.

Naquele mesmo ano, Swamy [24] apresentou um estudo sobre as propriedades e o comportamento estrutural de concretos de alta resistência. Neste estudo, 3 tipos de cimento foram utilizados, de modo a atingir elevadas resistências iniciais e finais: cimento Portland ultrafino de alta resistência inicial, cimento de alta resistência inicial e cimento aluminoso. Com o emprego de tais cimentos, resistências à compressão na faixa de 60 a 80 MPa foram atingidas em 24 horas, utilizando-se agregados normais, enquanto que, empregando-se agregados leves, atingiu-se resistências à compressão de 10 a 25 MPa e de 25 a 45 MPa, em 12 e 24 horas, respectivamente. Swamy constatou que um crescimento acelerado da resistência à compressão à baixas idades implica em, praticamente, nenhum ganho de resistência, após 28 dias de idade. Foram também apresentados resultados de resistência à tração, determinada pelos ensaios de flexão e compressão diametral e módulo de elasticidade, no período entre 24 horas e 640 dias. Foi observado que, tanto o módulo quanto a resistência à tração não crescem na mesma proporção que a resistência à compressão.

Ainda em 1985, Ahmad e Shah [25] apresentaram um artigo com expressões que correlacionam as propriedades mecânicas de concretos baseadas em resultados obtidos por eles mesmos e outros pesquisadores. Tais expressões são válidas para concretos com resistência à compressão até 84 MPa. Para a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, Ahmad e Shah propuseram a seguinte equação:

$$E_c = 3,38 \times 10^{-5} w^{2,5} (f_c)^{0,325} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.8)$$

para $f_c < 83$ MPa

Para concretos de resistência à compressão baixa e média, a equação proposta acima apresentou boa concordância com a equação da norma americana *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318/89) [15]. Porém, o mesmo não foi observado para os concretos de alta resistência: a equação proposta mostrou-se mais precisa para se estimar os valores do módulo de elasticidade em

função da resistência à compressão. Para a correlação entre a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral e a resistência à compressão, os autores sugerem a expressão:

$$f_t = 0,46 (f_c)^{0,55} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.9)$$

para $f_c < 83$ MPa

Em 1988, Macedo *et alli* [26] apresentaram resultados experimentais de uma pesquisa desenvolvida no Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), sobre a influência do tipo de agregado graúdo nas correlações entre as resistências do concreto à compressão simples, à tração por flexão e à tração por compressão diametral, determinadas nas idades de 7 e 28 dias. Neste trabalho foram discutidos apenas os resultados obtidos para a idade de 7 dias. Foram produzidos concretos com 5 relações água/cimento, usuais em obras de pavimentação (0,40; 0,45; 0,50; 0,55 e 0,60). Empregou-se cimento Portland comum, classe 32, areia natural quartzosa e 4 tipos de agregados graúdos: brita calcária, brita granítica, brita basáltica e seixo rolado. A resistência à compressão, na idade de 7 dias, variou entre 23 a 43 MPa; a resistência à tração por flexão variou entre 3 e 5 MPa e, finalmente, a resistência à tração por compressão diametral variou entre 2 e 4 MPa. As seguintes conclusões foram observadas:

- (1) A influência da relação água/cimento é mais marcante na resistência à compressão. Por outro lado, o efeito dos diferentes tipos de agregados graúdos na resistência à compressão não é tão grande como nas resistências à tração por flexão e por compressão diametral.
- (2) Em todos os ensaios, os concretos produzidos com agregados arredondados e lisos (seixo rolado) apresentaram os valores mais baixos de resistências à compressão e à tração. A utilização de brita calcária conduziu a resistências ligeiramente mais elevadas, principalmente nas resistências à tração por flexão e por compressão diametral, quando comparadas com os valores apresentados pelos concretos fabricados com granito e basalto.

- (3) As correlações entre as resistências mecânicas foram influenciadas de forma marcante pelo tipo de agregado graúdo, sendo que, nas relações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples, o calcário apresentou o maior coeficiente de correlação (0,91); o seixo rolado, o menor (0,74); ficando o valor apresentado pelo granito e basalto, em torno de 0,85.

Utilizando-se o conjunto de resultados obtidos com os 4 tipos de agregados graúdos, os autores determinaram a seguinte correlação genérica entre a resistência à tração, determinada por compressão diametral, e a resistência à compressão simples, na idade de 7 dias:

$$f_t = 0,062 f_c + 1,28 \quad (\text{em MPa}) \quad (2.10)$$

Shih *et alli* [27] apresentaram, em 1989, resultados de um estudo experimental sobre o módulo de elasticidade estático de concretos de resistência normal e de concretos de alta resistência. Empregou-se cimento Portland comum e brita calcária para a fabricação dos concretos de alta resistência enquanto que, para a fabricação dos concretos de resistência normal, utilizou-se cimento de alta resistência inicial e cascalho, dosados para resistência à compressão, na idade de 28 dias, de 62 e 38 MPa, respectivamente. O peso específico dos concretos foi 2421 kg/m³, aproximadamente. Foram ensaiados um total de 129 corpos-de-prova cilíndricos no período entre 2 e 12 semanas, após a sua moldagem. Os autores compararam os seus dados com a equação proposta por Carrasquillo, em 1980 [10] e observaram que esta relação é bastante conservadora para concretos com resistências acima de 41 MPa. Baseando-se nos resultados obtidos e em dados coletados de diversos pesquisadores, os autores propuseram a seguinte expressão que relaciona o módulo de elasticidade e a resistência à compressão:

$$E_c = 4660 \sqrt{f_c} - 1370 \quad (\text{em MPa}) \quad (2.11)$$

para 21 MPa < f_c < 83 MPa

Naquele mesmo ano, Held [28] relatou alguns resultados de pesquisas realizadas em diferentes instituições a respeito das propriedades mecânicas de concretos de alta resistência. As seguintes observações foram apresentadas pelo autor:

- (1) Com relação à curva tensão-deformação, existem diferenças significativas entre os concretos de resistência normal e os concretos de alta resistência. A porção ascendente da curva dos concretos de alta resistência apresenta um trecho linear maior, chegando a níveis de tensão por volta de 0,80 a 0,90 da tensão máxima. Este fato pode ser explicado, pelo desenvolvimento das microfissuras internas. Até 65% da tensão máxima, os concretos de alta resistência apresentam pequena microfissuração e, mesmo para níveis de tensão maiores, esta microfissuração apresenta-se, na sua maior parte, na forma de fissuras isoladas na interface argamassa-agregado (fissuras de ligação). Além disso, tais concretos apresentam um ligeiro aumento da deformação correspondente à tensão máxima. Por outro lado, a porção descendente da curva tensão-deformação dos concretos de alta resistência apresenta-se com grande inclinação, refletindo uma redução na ductilidade, quando comparados com os concretos de resistência normal.
- (2) Com relação à resistência à compressão devido a carregamentos permanentes, os concretos de alta resistência apresentaram uma redução de 5 a 15% em relação à resistência à compressão, devido a carregamentos de curta duração. Para os concretos de resistência normal, esta redução é da ordem de 25%.
- (3) As expressões para se determinar o valor do módulo de elasticidade devem ser reexaminadas, uma vez que, a maioria das normas de projeto superestimam este valor em cerca de 20% para concretos com resistência à compressão acima de 40 MPa.

A norma *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, elaborada pelo Comitê 318 do ACI [15], na sua edição de 1989, propôs a seguinte relação entre o módulo de elasticidade secante e a resistência à compressão de concretos de peso específico normal:

$$E_c = 4730 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.12)$$

Em 1990, Gardner [29] apresentou um estudo sobre os efeitos da temperatura de cura nas propriedades mecânicas de concretos fabricados com cimento Portland comum, cimento de alta resistência inicial e cimento Portland comum, com substituição de 25% do cimento por cinza volante. Para cada tipo de cimento, foram produzidos concretos com relações água/material cimentante iguais a 0,35 e 0,55. As propriedades investigadas foram a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral. Ambas foram avaliadas em cilindros de 150 mm x 300 mm. Os corpos-de-prova de cada concreto foram curados em tanques de água a temperaturas de 0° C, 10° C, 20° C e 30° C e ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 e 112 dias. Gardner concluiu que:

- (1) A evolução da resistência à compressão é influenciada pela relação água/material cimentante, bem como pelo tipo de cimento e pela temperatura de cura. Para todos os concretos investigados, o crescimento inicial da resistência à compressão para a temperatura de cura de 0° C foi menor.
- (2) Para idades superiores a 3 dias, a resistência à compressão dos concretos fabricados com cimento de alta resistência inicial, independentemente da relação água/cimento, não foi afetada pela temperatura de cura. O mesmo foi observado pelo concreto fabricado com cimento Portland comum com relação água/cimento de 0,35.
- (3) Para idades superiores a 14 dias, a resistência à compressão dos concretos fabricados com cimento Portland comum/cinza volante, curados às temperaturas de 0° C e 10° C foi sempre inferior (cerca de 10 MPa), quando comparada aos valores apresentados por concretos similares, curados à temperatura de 20° C. Esta redução na resistência à compressão devido a baixas temperaturas de cura, mostrou-se bastante elevada nas idades inferiores a 14 dias.

Gardner analisou, estatisticamente, os seus resultados e observou que a correlação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão é independente do tipo de cimento, da idade do ensaio e da temperatura de cura. Ele também examinou as correlações entre as propriedades mecânicas do concreto propostas por diversas normas. Estas relações baseiam-se

em resultados de ensaios em concretos de resistência normal, na idade de 28 dias. Segundo Gardner “a prática de acelerar as construções, resultando em esforços significativos no concreto a baixas idades, justifica uma reavaliação das várias relações”. As correlações entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão foram igualmente examinadas, baseando-se em resultados obtidos pelo autor em trabalhos anteriores. Gardner constatou que, para uma faixa de valores mais baixos da resistência à compressão, as normas americana *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318/89) [15] e canadense *Code for Design of Concrete Structures for Buildings* (CSA/84) são significativamente mais conservadoras que as normas europeia *Model Code for Concrete Structures* (CEB-FIP - 1978) e britânica *Structural Use of Concrete* (BS 8110/85). O autor propôs as seguintes relações entre a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral e entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático, para qualquer tipo de cimento e temperatura de cura:

$$f_t = 0,33 (f_c)^{2/3} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.13)$$

$$E_c = 3240 (f_c)^{0,63} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.14)$$

Ressalta-se que estas relações foram baseadas em resultados de resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm, compreendidos entre 4 e 57 MPa.

O CEB, juntamente com a FIP, em 1991, publicaram a mais recente versão do código modelo *CEB-FIP Model Code 1990* [30]. As correlações entre as propriedades mecânicas do concreto, que nele constam, são válidas para concretos de peso específico normal e com resistência característica à compressão, aos 28 dias, variando entre 12 e 80 MPa. Segundo esse código modelo, o módulo de elasticidade tangente, na origem do diagrama tensão-deformação, pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$E_{co} = \alpha_\beta \alpha_E [f_{cm} / f_{cmo}]^{1/3} \cong 9979 [f_{cm}]^{1/3} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.15)$$

onde α_{β} = fator de correção do módulo de elasticidade, para diferentes tipos de agregados gráudos. Por exemplo, para concretos fabricados com brita calcárea, este fator é igual a 0,9;

$$\alpha_E = 2,15 \times 10^4 \text{ MPa};$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (em MPa)} = \text{resistência à compressão a 28 dias; e}$$

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa.}$$

Ainda segundo esse código modelo, o valor do módulo de elasticidade tangente, na origem do diagrama tensão-deformação, é aproximadamente igual à inclinação da reta secante do trecho de descarregamento, antes da ocorrência de deformações plásticas iniciais. Assim sendo, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade secante a partir do valor do módulo de elasticidade tangente, calculado de acordo com a expressão (2.15). Para se estimar o valor da resistência à tração axial média do concreto, o CEB-FIP MC/90 recomenda o emprego da seguinte expressão:

$$f_{ctm} = \alpha_{fct,m} \left(f_{ck}/f_{ck0} \right)^{2/3} \cong 0,30 \left(f_{ck} \right)^{2/3} \text{ (em MPa)} \quad (2.16)$$

onde $\alpha_{fct,m} = 1,40 \text{ MPa}$; e

$$f_{ck0} = 10 \text{ MPa.}$$

Essa resistência à tração axial média pode ser ainda estimada através da resistência à tração, determinada por compressão diametral, empregando-se a relação:

$$f_{ctm} = 0,9 f_t \text{ (em MPa)} \quad (2.17)$$

Uma ampla investigação sobre as propriedades físicas do concreto a baixas idades foi realizada por Oluokun [31], na University of Tennessee, EUA e publicada por Oluokun, Burdette e Deatherage, em 1991 [32] [33]. Foram investigadas a resistência à compressão, o módulo de elasticidade estático, a resistência à tração por compressão diametral e o coeficiente de Poisson nas idades de 6 e 12 horas e 1, 2, 3, 7 e 28 dias. Foi empregado cimento Portland comum na fabricação dos concretos, os quais apresentaram valores de resistência à compressão aos 28 dias entre 28 e 62 MPa. Foram estudados 4 concretos: três foram preparados em laboratório e curados numa câmara úmida à temperatura de

23° C e um foi fornecido por um fabricante de concreto pré-moldado e submetido a curas úmida e a vapor. Todos os ensaios foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm. Simultaneamente ao ensaio de compressão simples, as deformações longitudinal e lateral foram medidas de modo a fornecer os dados necessários para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a norma americana ASTM C 469 - 81 [41]. Além de uma análise criteriosa dos resultados, os autores também avaliaram a concordância de algumas correlações entre as propriedades mecânicas e os resultados obtidos experimentalmente. O estudo relevou o seguinte:

- (1) De uma maneira geral, todas as propriedades mecânicas evoluíram rapidamente nas 12 primeiras horas após a concretagem. A baixas idades (3 primeiros dias), o módulo de elasticidade apresentou o crescimento mais rápido, enquanto que a taxa de crescimento da resistência à tração foi apenas ligeiramente superior à da resistência à compressão.
- (2) Quanto mais rápido o crescimento de uma determinada propriedade mecânica às baixas idades, mais lento será o seu crescimento nas idades mais avançadas. Conseqüentemente, o módulo de elasticidade, com a maior taxa de crescimento às baixas idades, apresentou o menor crescimento nas idades superiores a 3 dias.
- (3) O coeficiente de Poisson mostrou-se independente da idade de ensaio, do tipo de concreto e do tipo de cura utilizado.
- (4) Os resultados revelaram que o módulo de elasticidade do concreto é, de fato, proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão. Esta relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão elevada à potência 0,5 mostrou-se válida para todas as idades nas quais a resistência à compressão foi superior a 3 MPa.

- (5) Comparações entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e os valores previstos pelas equações exata (em função do peso específico do concreto) e aproximada (para concretos com peso específico normal e adotado como sendo igual a 2324 kg/m^3) da norma americana *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318/89) [15] revelaram que:
- (a) para o concreto com resistência à compressão normal (28 MPa), ambas as equações do ACI 318/89 subestimaram os valores do módulo de elasticidade para resistências à compressão, na faixa entre 3 MPa e 28 MPa.
 - (b) para o concreto com resistência à compressão média (43 MPa), a equação exata apresentou boa concordância com os valores experimentais do módulo de elasticidade, para idades superiores a 6 horas. A equação aproximada subestimou estes em todas as idades, com exceção da idade de 6 horas com resistência à compressão igual a 3 MPa.
 - (c) para o concreto com alta resistência à compressão (61 MPa), os valores do módulo de elasticidade foram, em todas as idades, ligeiramente superestimados pela equação exata. Empregando-se a equação aproximada, os valores foram subestimados.
- (6) A resistência à tração, determinada por compressão diametral mostrou-se proporcional à resistência à compressão elevada à potência 0,79. A seguinte relação foi proposta pelo autor para qualquer idade na qual a resistência à compressão é superior a 7 MPa:

$$f_t = 0,21 (f_c)^{0,79} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.18)$$

para $f_c > 7\text{MPa}$

Nas idades cuja a resistência à compressão é inferior a 7 MPa, o autor propôs a relação:

$$f_t = 0,13 (f_c)^{0,6} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.19)$$

para $f_c < 7 \text{ MPa}$

- (7) A cura a vapor acelerou a taxa de crescimento das propriedades mecânicas, somente a baixas idades. Porém, este efeito benéfico foi menor para a resistência à tração.

O concreto de alta resistência foi estudado por Souza e Dantas, em 1991 [48]. Foram investigados concretos produzidos com e sem aditivo superplastificante, dois tipos de cimento (cimento Portland de alto forno e cimento Portland comum) e dois tipos de agregados graúdos (granito e calcário). Foram determinadas as resistências à compressão axial e diametral, tração por flexão e módulo de deformação estático. Os autores concluíram que o cimento Portland de alto forno demonstrou comportamento mecânico semelhante ao cimento Portland comum, compatível para a aplicação em concretos de alta resistência. Quanto à natureza dos agregados, foi observado um melhor desempenho para o concreto com o granito, quando submetido ao ensaio compressão axial e apresentando-se como material mais deformável que aquele preparado com calcário. Adicionalmente, observou-se pouca influência dos agregados na evolução da resistência à tração.

Em 1992, Baalbaki *et alli* [34] investigaram as relações entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão recomendadas pelos comitês americano (ACI 363), europeu (CEB-FIP) e norueguês (NS 3473) para concretos de alta resistência. Foram fabricados 7 concretos, de mesma composição, com cimento de alta resistência, microssilica e areia natural, variando-se apenas o tipo de agregado graúdo (2 calcários, 1 granito, 2 quartzitos e 2 arenitos). Os ensaios para a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm nas idades de 28 e 91 dias. Resistências à compressão variaram entre 89 e 103 MPa e entre 99 e 116 MPa, nas idades de 28 e 91 dias, respectivamente. Os resultados indicaram que a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, válida para concretos de resistência normal, não pode ser extrapolada para concretos de alta resistência fabricados com diferentes tipos de agregados graúdos.

O comitê 363 do ACI publicou, em 1992, a segunda versão do relatório sobre o estado-da-arte do concreto de alta resistência, *ACI 363R-92 - State-of-the-Art Report on High Strength Concrete* [2]. Para concretos de peso específico normal e com resistência à compressão compreendida na faixa entre 21 e 83 MPa, esse comitê recomenda as mesmas expressões propostas por Carrasquillo [10]. Ou seja, para a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, esse comitê recomenda a seguinte expressão:

$$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \quad (\text{em MPa}) \quad (2.5)$$

para $21 \text{ MPa} < f_c < 83 \text{ MPa}$

Para a correlação entre a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, a seguinte equação é recomendada:

$$f_t = 0,59 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (2.6)$$

para $21 \text{ MPa} < f_c < 83 \text{ MPa}$

Do que foi exposto acima, pode-se observar que as propriedades mecânicas dos concretos têm sido objeto de intensivos estudos desde a década de 30. Os primeiros trabalhos restringiram-se, na sua maioria, ao estudo das propriedades mecânicas de concretos com resistência à compressão inferior a 40 MPa, na idade de 28 dias. Somente mais recentemente é que os estudos passaram a ser direcionados para os concretos de resistência à compressão mais elevada e idades abaixo dos 28 dias.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Introdução

Neste capítulo, está descrito o procedimento experimental referente à fabricação dos concretos cujas propriedades mecânicas foram investigadas, à moldagem e à cura dos corpos-de-prova, bem como a metodologia dos ensaios.

3.2 Materiais

Os concretos investigados foram todos fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), fabricado pela Ciminas Cimento Nacional de Minas S/A. Os resultados da análise dos cimentos, fornecidos pelo fabricante, estão apresentados na Tabela 3.1. A brita calcária foi fornecida pela Mineração Lapa Vermelha e a areia natural, pelo Areal Diniz, ambos localizados nas proximidades de Belo Horizonte. Os dados obtidos da análise dos agregados estão apresentados na Tabela 3.2. Pode-se constatar do exame das tabelas que os resultados apresentam conformidade com as especificações das respectivas normas. Optou-se pela não utilização da brita nº 1, seguindo-se a recomendação de Aïtcin [35] de se empregar em concretos de alta resistência, agregados grãos cujo diâmetro máximo esteja dentro do intervalo de 5 a 14 mm. Para melhorar a trabalhabilidade dos concretos de resistência à compressão esperada aos 28 dias de 55 e 60 MPa, utilizou-se o aditivo líquido superplastificante Adiment, fornecido pela Otto Baumgart Indústria e Comércio S/A. Empregou-se, nas concretagens, água potável livre de impurezas orgânicas.

Tabela 3.1 - Dados referentes à análise dos cimentos fornecidos pelo fabricante

Análise Química/ Características/ Propriedades	Norma do Ensaio	Especificações da NBR 5733	Traço A (30 MPa) Data Concretagem 18/05/93		Traço B (50 MPa) Data Concretagem 27/04/93		Traço C (55 MPa) Data Concretagem 08/06/93		Traço D (60 MPa) Data Concretagem 29/06/93	
			Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Perda ao Fogo (%)	NBR - 5743	≤ 4,5	2,85	-	2,99	-	2,82	-	2,81	-
SiO ₂ (%)	NBR - 5742	-	19,38	-	19,33	-	18,72	-	19,53	-
Al ₂ O ₃ (%)	NBR - 5742	-	4,82	-	4,84	-	4,48	-	5,65	-
Fe ₂ O ₃ (%)	NBR - 5742	-	3,14	-	3,16	-	3,13	-	2,91	-
CaO (%)	NBR - 5742	-	64,67	-	64,65	-	64,28	-	64,79	-
MgO (%)	NBR - 5742	≤ 6,5	0,66	-	0,67	-	0,72	-	0,66	-
SO ₃ (%)	NBR - 5745	-	2,75	-	2,76	-	2,66	-	3,07	-
Na ₂ O (%)	NBR - 5747	-	0,04	-	0,04	-	0,03	-	0,04	-
K ₂ O (%)	NBR - 5747	-	0,80	-	0,73	-	0,72	-	0,58	-
Res. Insolúvel (%)	NBR - 5744	≤ 1,0	0,34	-	0,32	-	0,30	-	0,31	-
Res. Pen. 325 (%)		≤ 6,0	5,3	0,7	5,5	0,3	5,7	0,4	4,9	0,6
Blaine (m ² / kg)		≥ 300	383	4	389	7	382	4	386	3
Início Pega (min)	NBR - 7215	≥ 60	147	5	144	4	141	6	149	6
Fim Pega (min)	NBR - 7215	≤ 600	225	6	220	7	221	10	229	10
Exp. Quente (mm)	NBR - 7215	≤ 5	0,4	0,1	0,3	0,1	0,5	0,1	0,3	0,2
Res. 1 dia (MPa)	NBR - 7215	≥ 14,0	26,2	0,7	25,9	1,0	24,8	0,5	25,5	0,5
Res. 3 dias (MPa)	NBR - 7215	≥ 24,0	38,4	0,9	38,6	0,6	38,7	0,8	39,1	0,3
Res. 7 dias (MPa)	NBR - 7215	≥ 34,0	42,7	0,8	43,1	0,7	42,8	1,5	43,7	0,8
Res. 28 dias (MPa)	NBR - 7215	-	51,4	1,9	50,1	1,0	50,6	1,2	52,5	1,4

Tabela 3.2 - Dados referentes à análise dos agregados

Procedência da Amostra		Data da Coleta da Amostra		Data do Ensaio					
Areal Diniz e Mineração Lapa Vermelha		14 / 09 / 92		14 a 16 / 09 / 92					
Composição Granulométrica (NBR - 7217)									
Peneira (mm)	Areia (Zona 2 - fina)			Brita Nº 0			Brita Nº 1		
	Peso Retido (g)	% Retida	% Acum.	Peso Retido (g)	% Retida	% Acum.	Peso Retido (g)	% Retida	% Acum.
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	0
19	-	-	-	-	-	-	392	7,84	7,84
12,5	-	-	-	-	-	0	-	-	7,84
9,5	-	-	0	177	3,54	3,54	3918	78,36	86,20
6,3	6	0,6	0 a 7	-	-	3,54	634	12,68	98,88
4,8	9	0,9	0 a 10	4509	90,18	93,72	20	0,40	99,28
2,4	5	0,5	0 a 15	283	5,66	99,38	7	0,14	99,42
1,2	54	5,4	0 a 25	2	0,04	99,42	1	0,02	99,44
0,6	322	32,2	21 a 40	1	0,02	99,44	-	-	99,44
0,3	374	37,4	60 a 88	-	-	99,44	-	-	99,44
0,15	182	18,2	90 a 100	-	-	99,44	-	-	99,44
Fundo	48	4,8	-	28	0,56	100,00	28	0,56	100,00
Mód.Fin.	2,23			5,94			6,91		
Ø máx.	2,4 mm			9,5 mm			25,0 mm		
Agregado	Peso Esp. Real (kg / dm ³)	Peso Unit. Seco (kg / dm ³)	Peso Unit. Úm. (h=4%) (kg / dm ³)	Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (%)		Teor de Materiais Pulverulentos (%)		Impurezas Orgânicas Húmicas (ppm)	
				Ensaio	Norma	Ensaio	Norma	Ensaio	Norma
Arcia	2,59	1,38	1,26	0,80	máx. 1,5	2,0	máx. 5,0	< 300	sol. padrão
Brita Nº 0	2,7	1,49	-	-	máx. 3,0	0,72	máx. 1,0	-	-
Brita Nº 1	2,63	1,48	-	-	máx. 3,0	0,60	máx. 1,0	-	-
Norma	NBR - 6458	NBR - 7251	NBR - 7251	NBR - 7218	NBR 7219	NBR 7219	NBR - 7220	NBR - 7220	NBR - 7220

3.3 Concretagem e Cura

Concretos com resistência à compressão, esperada aos 28 dias de 30, 50, 55 e 60 MPa foram estudados.

Uma série de ensaios preliminares foi realizada, de modo a se determinarem os traços dos concretos. Na dosagem dos concretos de alta resistência, optou-se pela não utilização de microssílica ou cinzas volantes e sim, pela utilização de elevado consumo de cimento e por um baixo fator água/cimento. Para se obter trabalhabilidade, empregou-se um aditivo superplastificante capaz de conduzir o abatimento do tronco de cone (“slump”) a valores em torno de 40 mm.

Os dados referentes aos traços empregados estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dados referentes aos traços empregados

(f_c) esperado (MPa)	Traço (em peso) cimento: areia: brita	Consumo de Cimento (kg / m ³)	Fator água / cimento (em peso)	Proporção aditivo / cimento (%, em peso)	“Slump” (mm)
30	1 : 2,40 : 4,60	277	0,660	-	10 a 30
50	1 : 0,60 : 1,90	620	0,360	-	10 a 30
55	1 : 0,88 : 1,92	589	0,330	1,00	30 a 40
60	1 : 0,76 : 1,64	661	0,295	1,25	30 a 40

A fabricação de cada concreto foi realizada numa betoneira de eixo horizontal, com capacidade de 900 kg. Minutos antes de iniciar-se a mistura, determinava-se a umidade da areia e corrigia-se as quantidades de areia e água a serem empregadas. A cuba era molhada, previamente à adição dos materiais, que seguia a ordem: agregado graúdo, cimento, agregado miúdo, água e superplastificante, quando empregado. Parte da água, cerca de 10%, era reservada, de modo a ser adicionada, aos poucos, no final da mistura, até atingir-se o slump desejado. O tempo de mistura total variou entre 5 e 10 minutos, interrompidos, ora para adicionar-se água, ora para medir-se o slump.

Após cada mistura, um total de 54 corpos-de-prova cilíndricos (36 cilindros de 150 mm x 300 mm e 18 cilindros de 100 mm x 200 mm) foram confeccionados em moldes metálicos, num intervalo de tempo médio de 30 minutos. A moldagem foi executada em 2 camadas com alturas aproximadamente iguais, utilizando-se um vibrador de agulha para o adensamento do concreto, de acordo com a NBR 5738 [36]. Após a moldagem, cada corpo-de-prova era coberto com uma proteção plástica, de modo a evitar a perda de umidade por evaporação. Os corpos-de-prova eram retirados das formas cerca de 20 horas após a concretagem e transferidos para uma câmara úmida, a uma temperatura de 23° C, aproximadamente, e umidade relativa de 95 a 100%. Eles somente eram retirados, minutos antes da realização dos ensaios.

3.4 Metodologia de Ensaio

Um total de 216 corpos-de-prova foram ensaiados para se estudar as propriedades mecânicas dos concretos. Na Tabela 3.4, é apresentado o programa desta pesquisa. Em seguida, serão descritos os procedimentos empregados na realização dos ensaios para cada propriedade.

Tabela 3.4 - Programa dos ensaios principais

Propr. Mecânica	Traço A (30 MPa)		Traço B (50 MPa)		Traço C (55 MPa)		Traço D (60 MPa)	
	Idade	Nº de CPs	Idade	Nº de CPs	Idade	Nº de CPs	Idade	Nº de CPs
Resistência à Compressão f_c	1 dia	3	1 dia	3	1 dia	3	1 dia	3
	3 dias	3	3 dias	3	3 dias	3	3 dias	3
	7 dias	3	7 dias	3	7 dias	3	7 dias	3
	14 dias	3	14 dias	3	14 dias	3	14 dias	3
	28 dias	3	28 dias	3	28 dias	3	28 dias	3
	56 dias	3	56 dias	3	56 dias	3	56 dias	3
Resistência à Tração f_t	1 dia	3	1 dia	3	1 dia	3	1 dia	3
	3 dias	3	3 dias	3	3 dias	3	3 dias	3
	7 dias	3	7 dias	3	7 dias	3	7 dias	3
	14 dias	3	14 dias	3	14 dias	3	14 dias	3
	28 dias	3	28 dias	3	28 dias	3	28 dias	3
	56 dias	3	56 dias	3	56 dias	3	56 dias	3
Módulo de Elasticidade E_c	1 dia	3	1 dia	3	1 dia	3	1 dia	3
	3 dias	3	3 dias	3	3 dias	3	3 dias	3
	7 dias	3	7 dias	3	7 dias	3	7 dias	3
	14 dias	3	14 dias	3	14 dias	3	14 dias	3
	28 dias	3	28 dias	3	28 dias	3	28 dias	3
	56 dias	3	56 dias	3	56 dias	3	56 dias	3

3.4.1 Resistência à Compressão Uniaxial

Na determinação da resistência à compressão, optou-se por empregar corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm em função da capacidade de 1200 kN da prensa utilizada. Previamente à realização do ensaio, a base e o topo dos corpos-de-prova foram capeados com material à base de enxofre. A prensa foi ajustada, de modo que a carga fosse aplicada, continuamente, a uma taxa variando entre 0,3 e 0,8 MPa por segundo, de acordo com as prescrições da NBR 5739 [37].

A resistência à compressão (f_c) foi calculada empregando-se a expressão:

$$f_c = \frac{4 P}{\pi D^2} \quad (3.1)$$

onde P é a carga máxima; e

D é o diâmetro do corpo-de-prova.

3.4.2 Módulo de Elasticidade Estático Secante

3.4.2.1 Ensaio Preliminares

Ensaio preliminares foram realizados para se determinar o fator de conversão entre as resistências à compressão obtidas em cilindros de 100 mm x 200 mm e em cilindros de 150 mm x 300 mm.

Estudos anteriores relativos a este fator de conversão revelaram uma grande discrepância de resultados. Em 1951, Price [38] apresentou um estudo sobre diversos fatores que influenciam a resistência à compressão do concreto. Entre eles, foram investigados os efeitos das dimensões do corpo-de-prova. Corpos-de-prova cilíndricos de diferentes diâmetros, porém, com relação altura/diâmetro constante e igual a 2, moldados, curados e ensaiados sob as mesmas condições, apresentaram diferentes resistências à compressão. A resistência à compressão de cilindros de 150 mm x 300 mm foi, em média, cerca de 3% inferior à resistência à compressão de cilindros de 100 mm x 200 mm. Em 1980, Carrasquillo [10] estudou tal fator de conversão para concretos com resistência à compressão, compreendida na faixa de 21 a 62 MPa, nas idades de 7, 28 e 95 dias. O autor obteve um fator médio de 0,90, para a relação entre as resistências à compressão de cilindros de 150 mm x 300 mm e de 100 mm x 200 mm, independentemente da resistência e da idade do ensaio. A aplicabilidade dos procedimentos comumente empregados na produção e no controle de qualidade de concretos foi estudada por Carrasquillo e Carrasquillo [39], em 1988, para os concretos de alta resistência. As variáveis estudadas foram as dimensões dos corpos-de-prova, o material dos moldes, o tipo de capeamento dos corpos-de-prova, o uso de aditivos superplastificantes e o processo de cura. Concretos com resistência à compressão entre 41 e 100 MPa foram estudados. Com relação às dimensões dos corpos-de-prova, os resultados da resistência à compressão de cilindros de 150 mm x 300 mm foram, em média, 7% maiores que os obtidos em cilindros de 100 mm x 200 mm. Agnesini e Silva [], apresentaram, em 1994, um quadro comparativo de resistências à compressão de três tipos de concretos de diferentes dimensões máximas características, resistências estas obtidas através de corpos-de-prova cilíndricos de dimensões variadas. Os autores

observaram que, para os microconcretos ($D_{\text{máx}} \leq 9,5$ mm), as resistências determinadas em corpos-de-prova de 75 mm x 150 mm e 100 mm x 200 mm foram praticamente iguais e superiores às obtidas em corpos-de-prova de 50 mm x 100 mm. Para os concretos dosados com brita nº 1 ($D_{\text{máx}} \leq 19$ mm), os valores das resistências em cilindros de 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm foram bastante próximos; no entanto, maior homogeneidade de resultados foi observada para os espécimes de 150 mm x 300 mm. Para os concretos fabricados com brita nº 2 ($D_{\text{máx}} = 25$ mm), as resistências apresentaram-se sempre inferiores nos corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm, relativamente aos de 150 mm x 300 mm.

Diante desta discrepância nos valores para o fator de conversão, optou-se por determinar tal fator para os concretos estudados, com exceção do concreto de resistência à compressão esperada aos 28 dias de 60 MPa, em função da limitação de carga da prensa. Para cada concreto, foram confeccionados 6 corpos-de-prova, 3 cilindros de 100 mm x 200 mm e 3 cilindros de 150 mm x 300 mm, os quais foram rompidos na idade de 7 dias. Os resultados de tais ensaios estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Resultados dos ensaios preliminares

Traço	Dimensões do CP (mm)	Número do CP	$(f_c)_i$ (MPa)	f_c (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$\frac{(f_c)_{150 \times 300}}{(f_c)_{100 \times 200}}$
Traço A (30 MPa)	150 x 300	CP 1	25,8	26,0	0,20	0,94
		CP 2	26,1			
		CP 3	26,1			
	100 x 200	CP 4	25,7	27,7	1,73	
		CP 5	29,0			
		CP 6	28,3			
Traço B (50 MPa)	150 x 300	CP 1	44,1	44,3	1,31	0,91
		CP 2	43,0			
		CP 3	45,6			
	100 x 200	CP 4	47,9	48,4	1,11	
		CP 5	49,7			
		CP 6	47,6			
Traço C (55 MPa)	150 x 300	CP 1	51,5	51,7	0,23	1,08
		CP 2	51,7			
		CP 3	51,9			
	100 x 200	CP 4	45,8	47,9	1,84	
		CP 5	49,4			
		CP 6	48,4			

O valor médio entre as 3 relações obtidas foi igual a 0,98. Optou-se então, por adotar, para todos os concretos e em todas as idades, o valor de 1,0 para o fator de conversão entre as resistências à compressão obtidas em cilindros de 100 mm x 200 mm e em cilindros de 150 mm x 300 mm, ou seja:

$$\frac{(f_c)_{150 \times 300}}{(f_c)_{100 \times 200}} \cong 1,0 \quad (3.2)$$

onde $(f_c)_{150 \times 300}$ é a resistência à compressão do cilindro 150 mm x 300 mm; e $(f_c)_{100 \times 200}$ é a resistência à compressão do cilindro 100 mm x 200 mm

3.4.2.2 Ensaios de Determinação do Módulo de Elasticidade

O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade estático secante foi realizado de acordo com a NBR 8522 [40], em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm, previamente capeados.

Após a realização dos ensaios à compressão simples, estimava-se a carga máxima equivalente para os corpos-de-prova de 150 mm x 300 mm, utilizando-se o fator de conversão entre as resistências igual a 1,0.

Os planos de carga executados seguiram, basicamente, o plano de carga III, recomendado pela NBR 8522 para a determinação do módulo de elasticidade estático secante. Segundo este plano, além da leitura de deformação correspondente à tensão de 0,5 MPa, deve-se efetuar leituras de deformação a cada décimo da resistência à compressão estimada, até atingir-se o nível de tensão igual a 0,8. Foram também incluídas nos planos de carga, leituras de deformação no início do carregamento, objetivando-se determinar o ponto do diagrama tensão-deformação correspondente à deformação de 5×10^{-5} , ponto este, necessário no cálculo do módulo de elasticidade, de acordo com a norma ASTM C 469-81 [41]. A Figura 3.1 ilustra, graficamente, o plano de carga efetuado durante o ensaio.

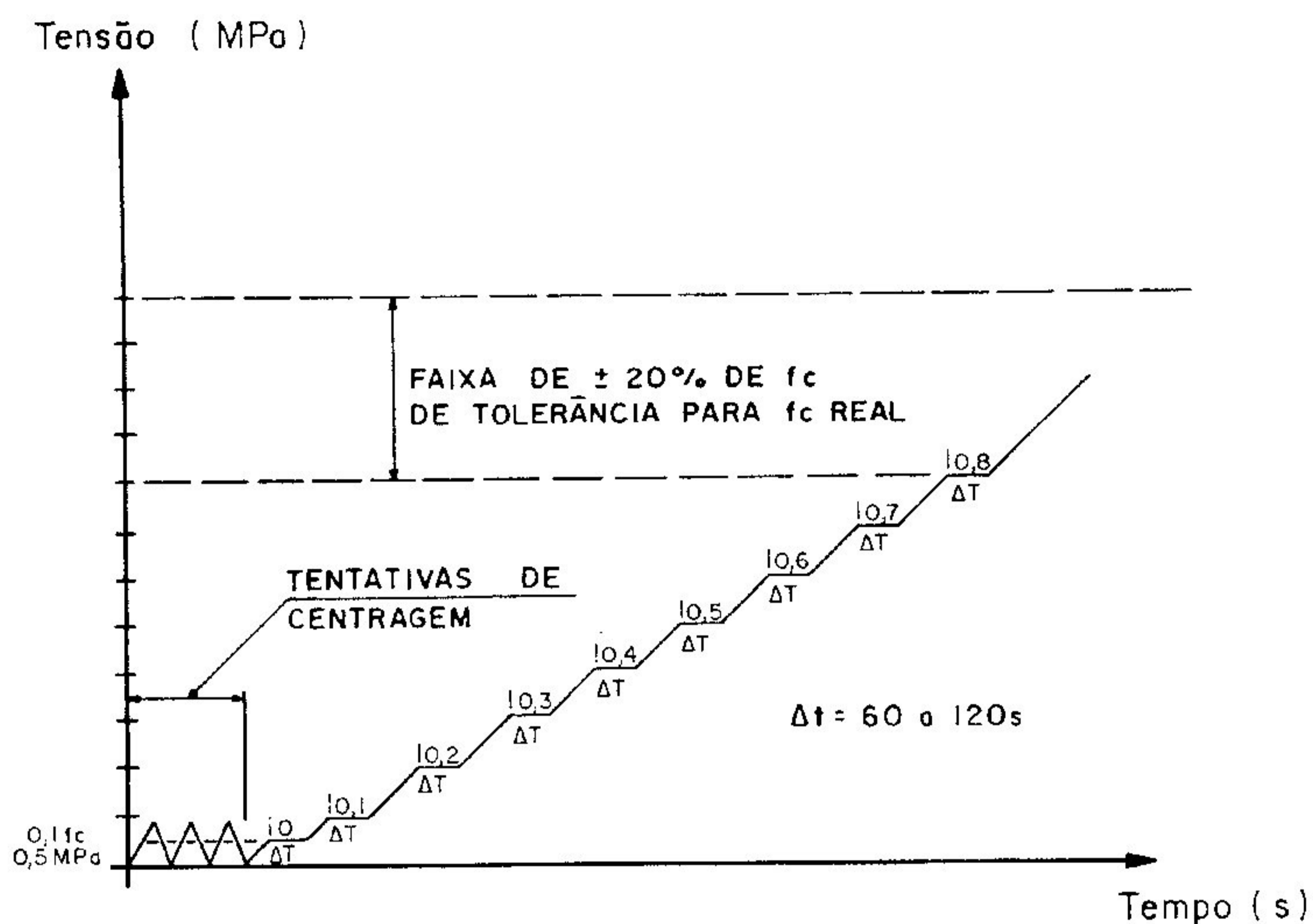


Figura 3.1 - Plano de carga efetuado na determinação do módulo de elasticidade

Para a medida das deformações longitudinais, utilizou-se dois transdutores de deslocamento axial ISM-04, fabricados pela Straintec. Estes transdutores eram instalados a um compressômetro já devidamente acoplado ao corpo-de-prova. Uma fonte de excitação EQE-01, também fabricada pela Straintec, era responsável pela alimentação dos mesmos. A voltagem de excitação dos transdutores foi ajustada, em todos os ensaios, em 2 Volts. Numa maleta de extensometria Sodmex MDC-10 com 10 canais, eram obtidas as leituras digitais da diferença de potencial dos transdutores, em Volts. Na Figura 3.2, é apresentado um esquema da montagem dos equipamentos para a realização do ensaio.

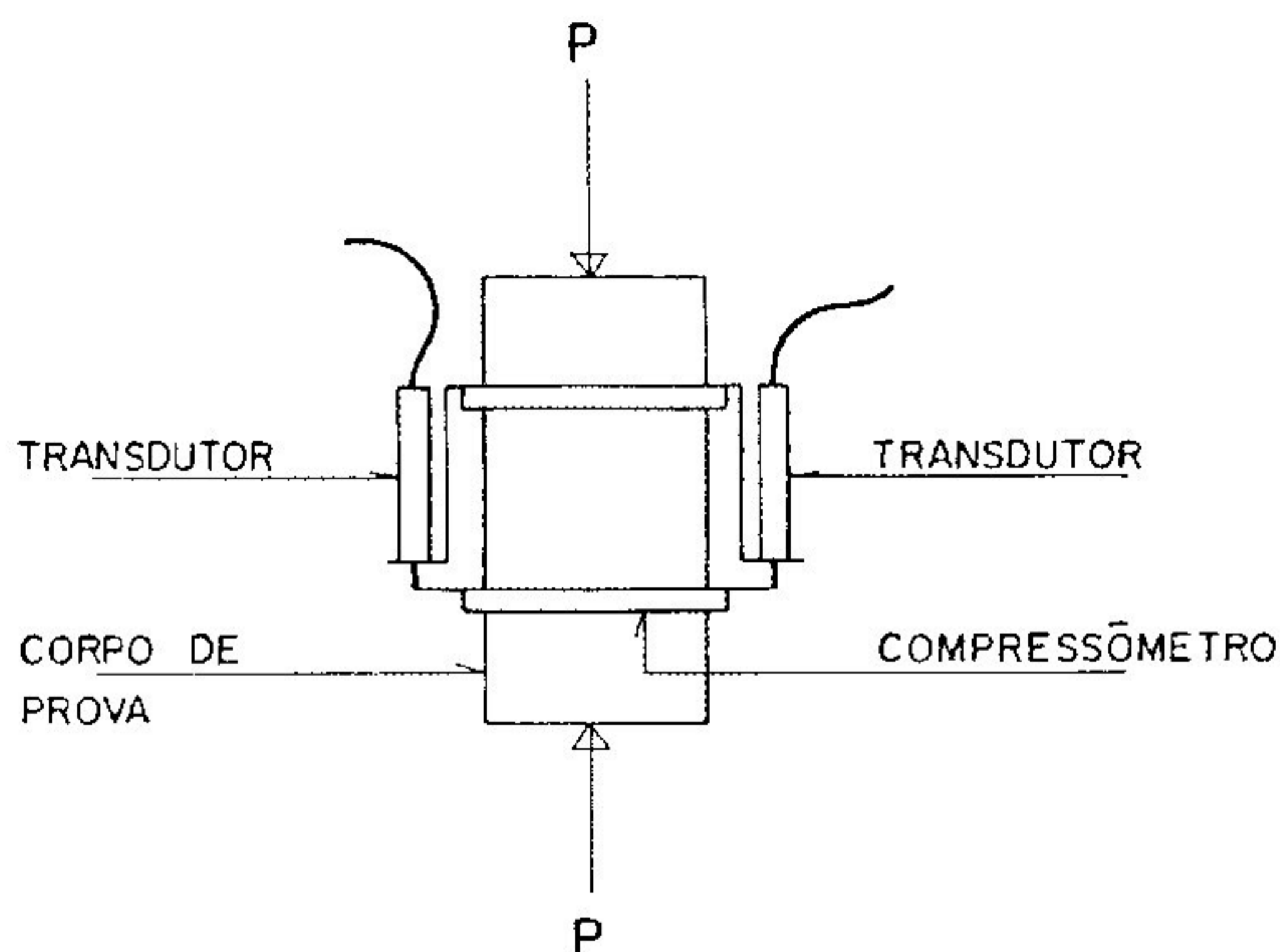


Figura 3.2 - Montagem para a execução do ensaio do módulo de elasticidade

Previamente à realização dos ensaios, foi determinada a constante de calibração de cada transdutor. Foram empregados nesta calibração, uma viga em balanço, um relógio comparador da marca Mitutoyo, de precisão de milésimo de milímetro e curso de 5 mm. A Figura 3.3 ilustra a montagem utilizada para esta calibração. Deslocamentos pré-estabelecidos foram aplicados na extremidade livre da viga em balanço. Para cada deslocamento imposto e controlado pelo relógio comparador foi feita, na maleta de extensometria, uma leitura da diferença de potencial, em Volts. Plotando-se em um gráfico a diferença de potencial \times deslocamento, a constante de calibração de cada transdutor foi obtida por regressão linear. Este procedimento foi repetido 3 vezes para cada transdutor e a constante de calibração adotada foi a média das constantes determinadas em cada operação.

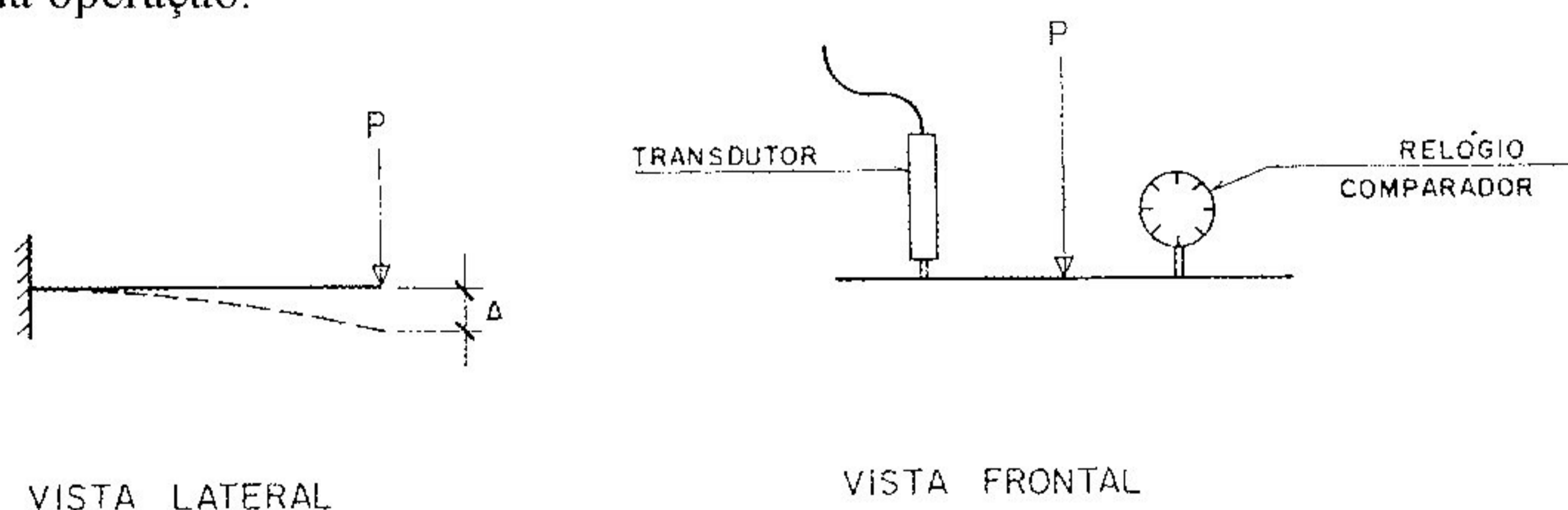


Figura 3.3 - Montagem para a calibração dos transdutores.

Após a execução dos ensaios para a determinação do módulo de elasticidade, os deslocamentos longitudinais (ΔL) foram obtidos, multiplicando-se as leituras de cada transdutor pela sua respectiva constante de calibração. As deformações longitudinais (ε) foram calculadas, por sua vez, dividindo-se os deslocamentos obtidos pelo valor inicial do comprimento do compressômetro (L_0), ou seja:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.3)$$

A deformação correspondente a cada nível de tensão foi a média das deformações obtidas nos dois transdutores.

Segundo a NBR 8522, o módulo de elasticidade secante correspondente ao nível de tensão 0,40 é determinado, empregando-se a expressão:

$$E_c = \frac{\sigma_{40} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{40} - \varepsilon_{inf}} \quad (3.4)$$

onde E_c é o módulo de elasticidade secante correspondente à inclinação da reta, unindo os pontos do diagrama tensão-deformação relativos às tensões σ_{40} e σ_{inf} ;

σ_{40} é a tensão correspondente a 40% da resistência esperada à compressão;

σ_{inf} é a tensão sempre igual a 0,5 MPa;

ε_{40} é a deformação longitudinal correspondente à tensão σ_{40} ; e

ε_{inf} é a deformação longitudinal correspondente à tensão σ_{inf} .

A Figura 3.4 ilustra, graficamente, a determinação do módulo de elasticidade secante à 40% da tensão máxima, segundo a NBR 8522.

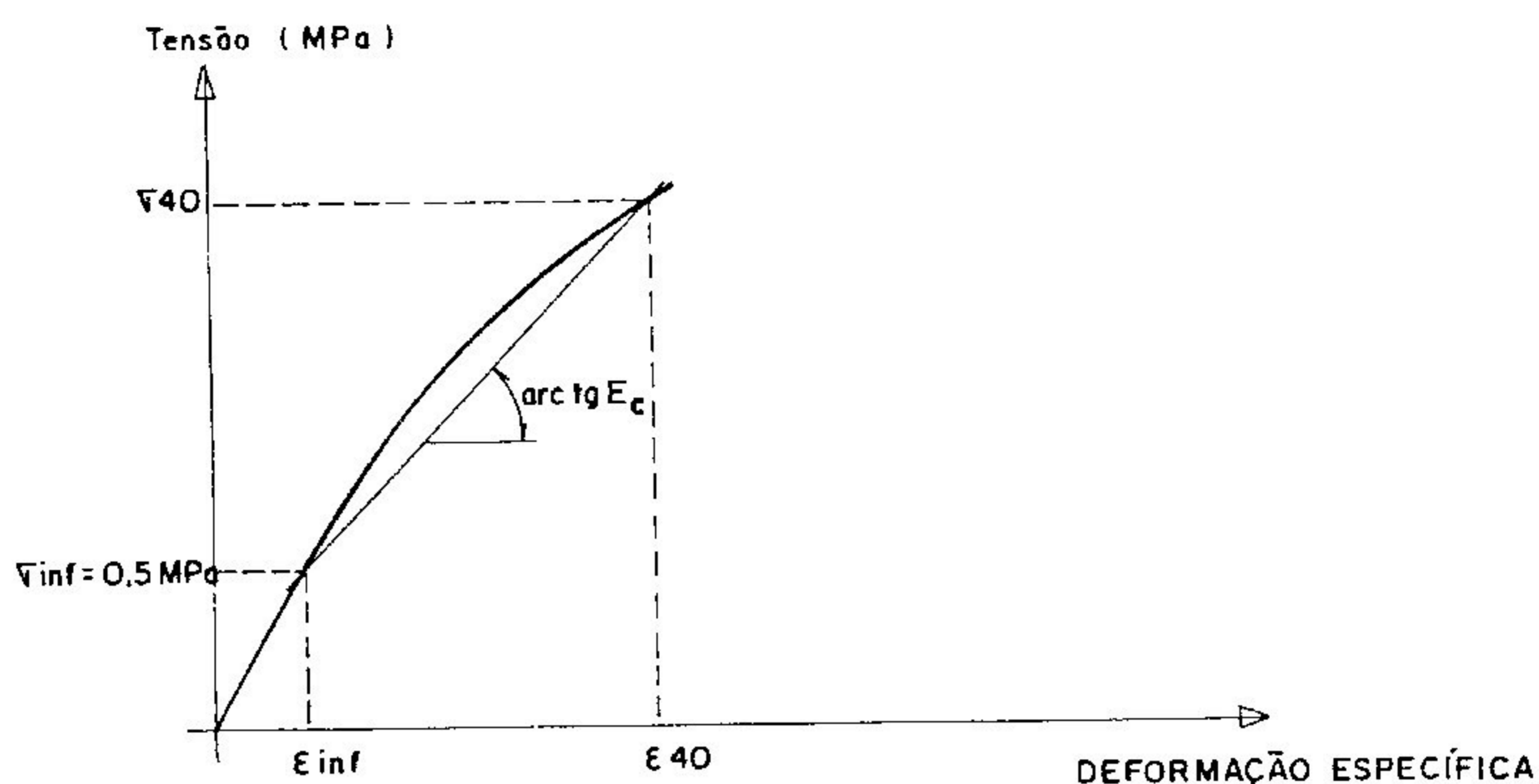


Figura 3.4 - Módulo de elasticidade estático secante segundo a norma brasileira

O módulo de elasticidade secante foi também determinado pelo método da corda especificado pela norma ASTM C 469 - 81. Esse método difere do da norma brasileira, NBR 8522, no que diz respeito ao ponto inferior da reta, cuja inclinação define o módulo de elasticidade. No caso da norma americana, a deformação $\bar{\epsilon}_{inf}$ é especificada igual a 5×10^{-5} e $\bar{\sigma}_{inf}$ passa a ser, então, a tensão correspondente a essa deformação, ou seja:

$$\bar{E}_c = \frac{\sigma_{40} - \bar{\sigma}_{inf}}{\epsilon_{40} - \bar{\epsilon}_{inf}} \quad (3.5)$$

onde \bar{E}_c é o módulo de elasticidade secante correspondente à inclinação da reta, unindo os pontos do diagrama tensão-deformação relativos às tensões σ_{40} e $\bar{\sigma}_{inf}$;
 σ_{40} é a tensão correspondente a 40% da resistência esperada à compressão;
 $\bar{\sigma}_{inf}$ é a tensão correspondente à deformação $\bar{\epsilon}_{inf}$;
 ϵ_{40} é a deformação longitudinal correspondente à tensão σ_{40} ; e
 $\bar{\epsilon}_{inf}$ é a deformação longitudinal igual a 5×10^{-5} .

A Figura 3.5 ilustra, graficamente, a determinação do módulo de elasticidade secante, segundo a ASTM C 469 - 81.

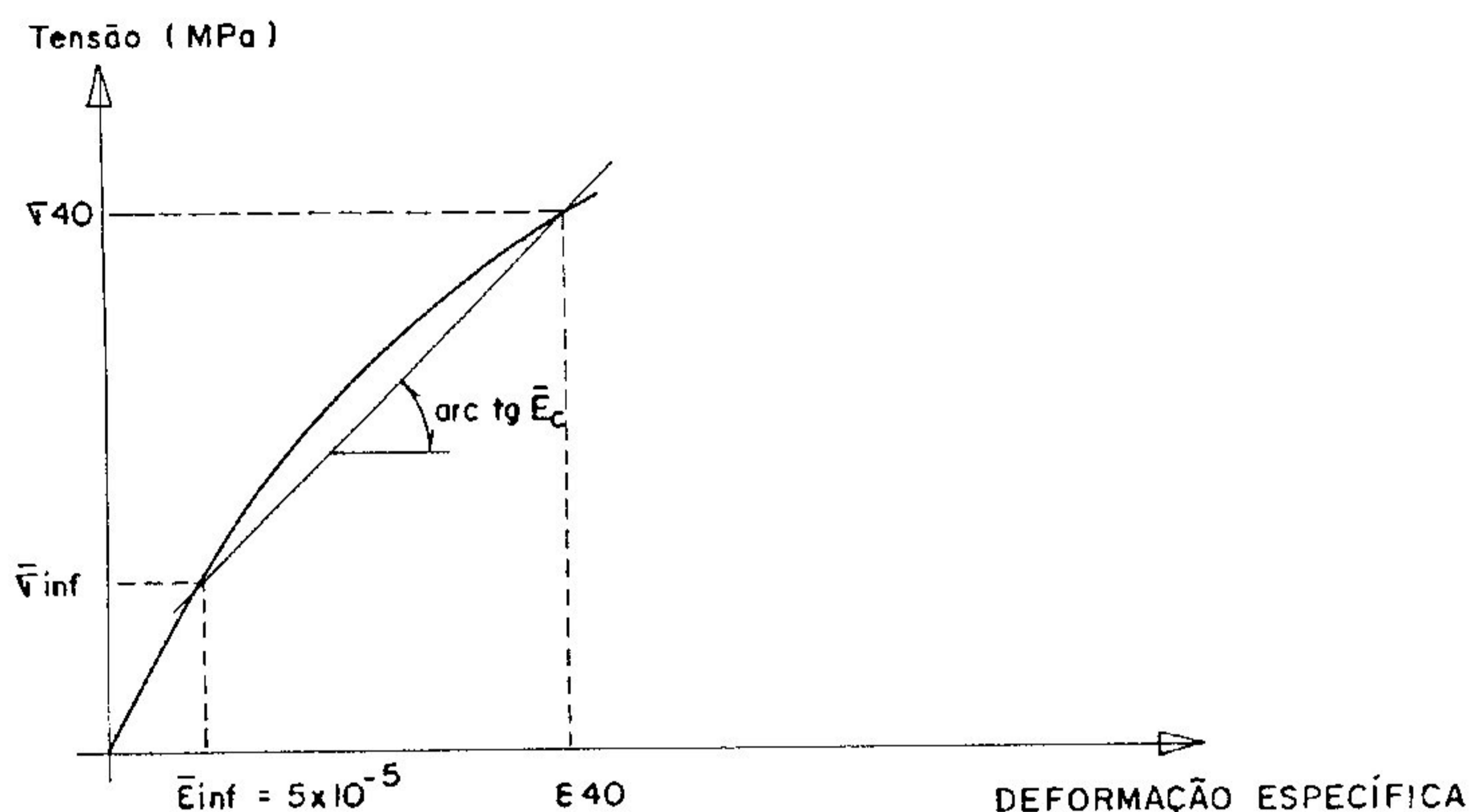


Figura 3.5 - Módulo de elasticidade estático secante segundo a norma americana

3.4.3 Resistência à Tração

A resistência à tração foi determinada, através do ensaio de compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm, de acordo com a NBR 7222 [42]. Realizou-se o ensaio, na mesma prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, adaptando-se porém, dispositivos complementares, de modo a garantir o contato entre o corpo-de-prova e os pratos da máquina de ensaio ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas do corpo-de-prova. Colocou-se, entre os pratos e o corpo-de-prova, duas tiras de madeira da espécie *Pinus*, objetivando-se corrigir as eventuais irregularidades na distribuição dos esforços ao longo das geratrizes de contato. As dimensões dessas tiras, especificadas na norma, foram 5 mm x 15 mm x 300 mm. Apesar desta norma ser omissa no que diz respeito ao reaproveitamento de tais tiras, seguiu-se a norma ASTM C 496 - 71 [43] que recomenda o uso de um par de tiras novas a cada ensaio.

A resistência à tração (f_t) foi calculada empregando-se a expressão:

$$f_t = \frac{2 P}{\pi D L} \quad (3.6)$$

onde P é a carga de ruptura;
 D é o diâmetro do corpo-de-prova; e
 L é o comprimento do corpo-de-prova.

Um esquema da realização do ensaio de compressão diametral é mostrado na Figura 3.6.

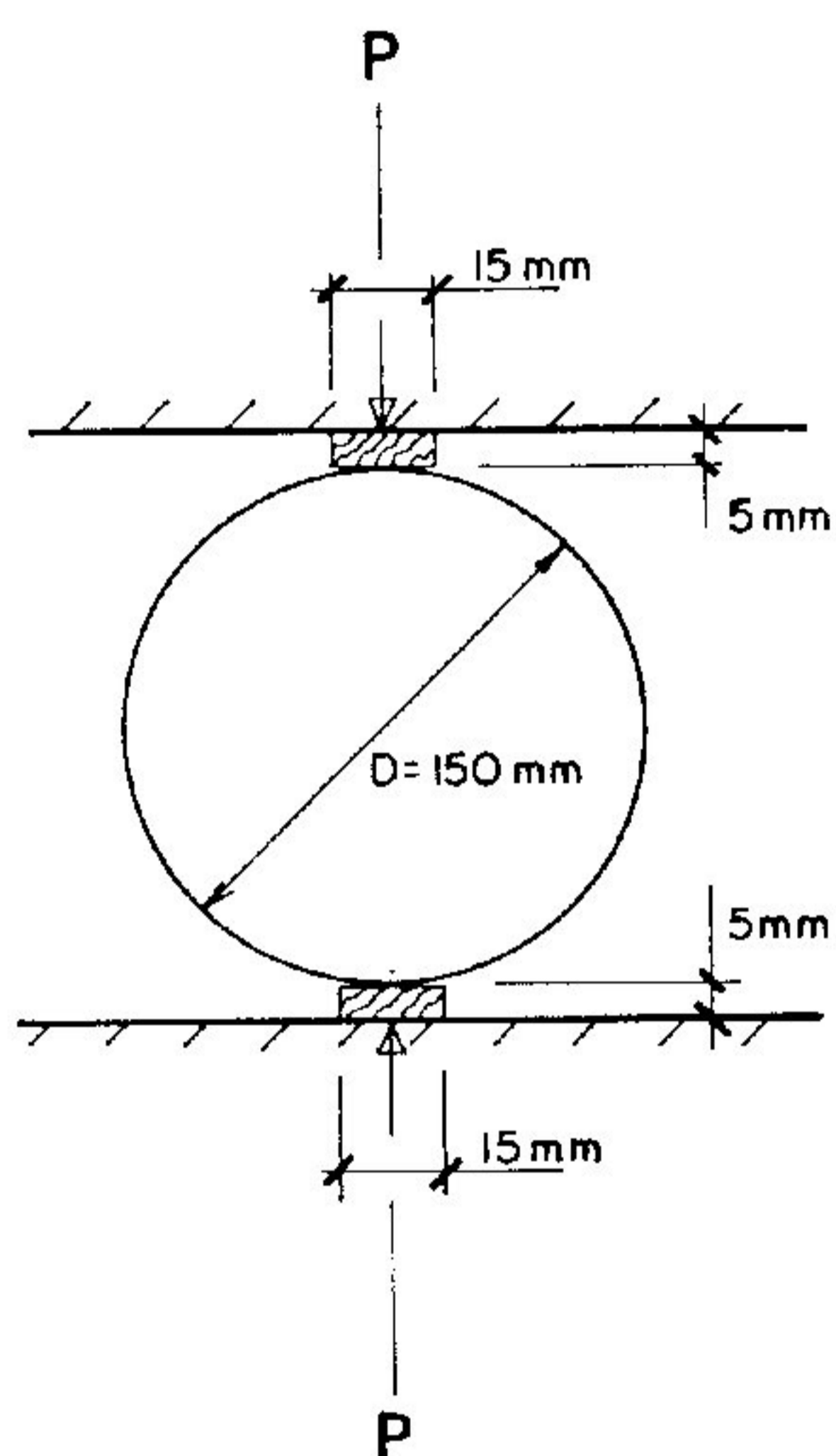


Figura 3.6 - Montagem para a execução do ensaio de compressão diametral

Capítulo 4

Apresentação dos Resultados

4.1 Introdução

Os resultados desta pesquisa incluem a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade estático secante calculado de acordo com as normas brasileira (NBR 8522) e americana (ASTM C 469-81). Como descrito no Capítulo 3, para cada concreto estudado, foram confeccionados 54 corpos-de-prova, divididos em 3 grupos de 18 corpos-de-prova, cada grupo correspondendo a cada uma das 3 propriedades investigadas. Em cada idade, foram calculados os valores médios dos 3 ensaios realizados para cada propriedade, bem como o desvio padrão dos resultados.

4.2 Resistência à Compressão Uniaxial

Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados referentes aos ensaios para a determinação da resistência à compressão nas várias idades.

4.3 Módulo de Elasticidade Estático Secante

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 estão apresentados os resultados dos ensaios para a determinação do módulo de elasticidade estático secante, nas várias idades, de acordo com as normas NBR 8522 e ASTM C 469-81, respectivamente, como descrito no item 3.4.2 do capítulo anterior.

Nas Tabelas 1 a 24 do Apêndice A estão apresentados os planos de carga executados para cada traço, nas diversas idades, bem como as deformações calculadas de cada transdutor para os 3 corpos-de-prova ensaiados.

4.4 Resistência à Tração

Os resultados referentes aos ensaios para a determinação da resistência à tração, determinada pelo método da compressão diametral, estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial

Idade	N ^o do CP	TRACO A (30 MPa)			TRACO B (50 MPa)			TRACO C (55 MPa)			TRACO D (60 MPa)		
		(f _c) _i (MPa)	f _c a (MPa)	D.P. b (MPa)	(f _c) _i (MPa)	f _c (MPa)	D.P. (MPa)	(f _c) _i (MPa)	f _c (MPa)	D.P. (MPa)	(f _c) _i (MPa)	f _c (MPa)	D.P. (MPa)
1 dia	CP 1	9,9	9,7	0,7	28,0	29,2	1,1	30,3	30,7	4,0	34,4	33,1	1,6
	CP 2	10,2			30,1			34,9			33,6		
	CP 3	8,9			29,5			27,0			31,3		
3 dias	CP 1	20,4	21,1	0,7	37,9	41,2	2,9	50,9	51,2	0,9	46,4	47,9	1,3
	CP 2	21,4			43,5			52,2			48,6		
	CP 3	21,7			42,0			50,4			48,6		
7 dias	CP 1	24,7	25,5	0,7	52,2	52,0	2,2	58,6	57,7	1,5	54,8	60,2	4,9
	CP 2	26,0			54,0			58,6			61,6		
	CP 3	25,7			49,7			56,0			64,2		
14 dias	CP 1	26,0	26,0	1,0	49,7	50,5	2,7	50,4	56,3	6,4	58,3	59,2	1,7
	CP 2	25,0			53,5			55,3			58,1		
	CP 3	27,0			48,4			63,2			61,1		
28 dias	CP 1	28,8	30,5	1,5	47,1	49,3	2,2	55,0	58,1	4,9	59,1	58,9	1,5
	CP 2	31,1			49,4			55,5			60,4		
	CP 3	31,6			51,4			63,7			57,3		
56 dias	CP 1	29,3	29,6	0,3	58,8	58,5	2,8	66,5	67,9	1,3	56,3	58,7	4,8
	CP 2	29,8			55,5			68,5			64,2		
	CP 3	29,8			61,1			68,8			55,5		

$$a - f_c = \frac{\sum_{i=1}^3 (f_c)_i}{3}$$

b - D. P. = desvio padrão

Tabela 4.2 - Resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático secante segundo a norma brasileira

Idade	Nº do CP	TRACO A (30 MPa)			TRACO B (50 MPa)			TRACO C (55 MPa)			TRACO D (60 MPa)		
		(E _c) _i (MPa)	E _c ^a (MPa)	D.P. b (MPa)	(E _c) _i (MPa)	E _c (MPa)	D.P. (MPa)	(E _c) _i (MPa)	E _c (MPa)	D.P. (MPa)	(E _c) _i (MPa)	E _c (MPa)	D.P. (MPa)
1 dia	CP 1	12730			22267			23704			26516		
	CP 2	15393	13137	2082	22534	23192	1379	26492	24753	1517	26055	27006	1269
	CP 3	11288			24777			24064			28446		
3 dias	CP 1	21691			27698			29157			28906		
	CP 2	22321	21331	1211	27735	28265	951	28171	28127	1053	33160	30788	2169
	CP 3	19981			29364			27053			30299		
7 dias	CP 1	30838			26204			30796			33423		
	CP 2	28105	29186	1454	29507	29080	2688	24186	26875	3473	30982	32440	1288
	CP 3	28615			31529			25642			32914		
14 dias	CP 1	23953			25688			34620			36640		
	CP 2	25060	23305	2154	25369	27109	2743	28540	33145	4073	33379	33066	3740
	CP 3	20901			30271			36274			29180		
28 dias	CP 1	20204			25404			33740			33244		
	CP 2	27789	23434	3916	26461	25932	748	31749	32433	1132	35958	33381	2512
	CP 3	22310			*			31810			30940		
56 dias	CP 1	24326			25009			39637			37629		
	CP 2	27926	27801	3415	24708	26213	2351	29677	34421	4997	37014	36437	1563
	CP 3	31152			28922			33949			34668		

$$a - E_c = \frac{\sum_{i=1}^3 (E_c)_i}{3}$$

b - D. P. = desvio padrão

* - resultados eliminados devido ao mal funcionamento do(s) transdutor(es)

Tabela 4.3 - Resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático secante segundo a norma americana

Idade	Nº do CP	TRACO A (30 MPa)			TRACO B (50 MPa)			TRACO C (55 MPa)			TRACO D (60 MPa)		
		$(\bar{E}_c)_i$ (MPa)	\bar{E}_c^a (MPa)	D.P. b (MPa)	$(\bar{E}_c)_i$ (MPa)	\bar{E}_c (MPa)	D.P. (MPa)	$(\bar{E}_c)_i$ (MPa)	\bar{E}_c (MPa)	D.P. (MPa)	$(\bar{E}_c)_i$ (MPa)	\bar{E}_c (MPa)	D.P. (MPa)
1 dia	CP 1	12730			22267			23704			26355		
	CP 2	15393	13137	2082	22999	23348	1291	26492	24558	1679	26055	26926	1257
	CP 3	11288			24777			23478			28367		
3 dias	CP 1	22693			27698			29157			28867		
	CP 2	22321	21364	1988	27735	28684	1676	27702	27937	1121	32661	30609	1916
	CP 3	19079			30620			26952			30299		
7 dias	CP 1	31390			26108			30818			34033		
	CP 2	28340	29448	1687	29022	28886	2713	24053	26904	3505	30982	32672	1552
	CP 3	28615			31529			25841			32999		
14 dias	CP 1	23816			25687			35355			36216		
	CP 2	25060	23259	2135	24898	26792	2626	28498	33441	4317	32963	32778	3533
	CP 3	20901			29789			36471			29156		
28 dias	CP 1	20204			25404			34929			33000		
	CP 2	27648	23387	3837	26739	26071	944	31798	32863	1790	36759	33722	2748
	CP 3	22310			*			31862			31407		
56 dias	CP 1	25218			25009			39637			37231		
	CP 2	27926	27809	2534	24864	26264	2302	29363	34346	5144	36633	36413	947
	CP 3	30282			28922			34038			35375		

$$a - \bar{E}_c = \sum_{i=1}^3 (\bar{E}_c)_i / 3$$

b - D. P. = desvio padrão

* - resultados eliminados devido ao mal funcionamento do(s) transdutor(es)

Tabela 4.4 - Resultados obtidos para a resistência à tração, determinada pelo método da compressão diametral

Idade	Nº do CP	TRACO A (30 MPa)			TRACO B (50 MPa)			TRACO C (55 MPa)			TRACO D (60 MPa)		
		(f _t) _i (MPa)	f _t ^a (MPa)	D.P. b (MPa)	(f _t) _i (MPa)	f _t (MPa)	D.P. (MPa)	(f _t) _i (MPa)	f _t (MPa)	D.P. (MPa)	(f _t) _i (MPa)	f _t (MPa)	D.P. (MPa)
1 dia	CP 1	1,55			2,95			3,80			3,85		
	CP 2	1,40	1,40	0,10	3,10	3,10	0,1	3,50	3,55	0,25	3,95	3,70	0,35
	CP 3	1,35			3,15			3,35			3,30		
3 dias	CP 1	2,60			3,75			4,85			4,75		
	CP 2	2,60	2,60	0	*	3,65	0,10	4,40	4,65	0,25	**	4,80	0,10
	CP 3	*			3,55			4,65			4,85		
7 dias	CP 1	2,75			3,95			5,00			4,75		
	CP 2	2,95	2,80	0,10	4,40	4,15	0,30	4,85	4,90	0,10	5,30	5,00	0,30
	CP 3	2,75			*			*			4,85		
14 dias	CP 1	2,95			3,55			3,75			5,65		
	CP 2	2,40	2,70	0,30	3,80	3,75	0,15	4,80	4,40	0,60	3,10	4,40	1,25
	CP 3	2,70			3,80			4,75			4,45		
28 dias	CP 1	2,85			3,45			4,35			4,55		
	CP 2	*	2,70	0,15	4,65	3,90	0,70	4,30	4,55	0,45	4,25	4,45	0,15
	CP 3	2,60			3,55			5,10			4,55		
56 dias	CP 1	3,35			4,00			4,90			4,80		
	CP 2	3,20	3,35	0,15	4,65	4,30	0,35	4,45	4,70	0,25	4,65	4,70	0,10
	CP 3	3,50			4,25			4,75			4,65		

$$a - f_t = \frac{\sum_{i=1}^3 (f_t)_i}{3}$$

b - D. P. = desvio padrão

* - Resultados eliminados devido à constatação, após o rompimento do corpo-de-prova, de um início de segregação do concreto

** - Resultado devido ao desaprumo das tiras de madeira durante o ensaio

Capítulo 5

Análise dos Resultados

5.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é analisar os resultados do presente trabalho que foram apresentados no capítulo anterior. Esta análise divide-se em duas partes: na primeira parte, é estudada a evolução das propriedades mecânicas dos concretos investigados; na segunda parte, é apresentado um estudo das correlações entre essas propriedades.

Antes, porém, de se iniciar esta análise, uma comparação entre os resultados do módulo de elasticidade estático secante, determinado pelo ensaio normalizado pela NBR 8522, com aqueles determinados pelo método da corda, especificado na norma ASTM C 469 - 81, será realizada. Na Tabela 5.1, apresenta-se os valores médios do módulo de elasticidade calculados segundo a norma americana e a norma brasileira. Essa tabela contém, também, a relação entre os dois valores.

Tabela 5.1 - Relação entre o valor do módulo de elasticidade calculado segundo a norma americana e o valor do módulo de elasticidade calculado segundo a norma brasileira

Traço (f_c esperado)	Idade (dias)	E_c (ABNT) (MPa)	\bar{E}_c (ASTM) (MPa)	\bar{E}_c/E_c
A (30 MPa)	1	13137	13137	1,000
	3	21331	21364	1,002
	7	29186	29448	1,009
	14	23305	23259	0,998
	28	23434	23387	0,998
	56	27801	27809	1,000
B (50 MPa)	1	23192	23347	1,007
	3	28265	28684	1,015
	7	29080	28886	0,993
	14	27109	26792	0,988
	28	25933	26071	1,005
	56	26213	26265	1,002
C (55 MPa)	1	24753	24558	0,992
	3	28127	27937	0,993
	7	26875	26904	1,001
	14	33145	33441	1,009
	28	32433	32863	1,013
	56	34421	34346	0,998
D (60 MPa)	1	27006	26926	0,997
	3	30788	30609	0,994
	7	32440	32672	1,007
	14	33066	32778	0,991
	28	33381	33722	1,010
	56	36437	36413	0,999

A relação média entre o valor do módulo de elasticidade calculado segundo a norma americana e o valor do módulo de elasticidade calculado segundo a norma brasileira foi igual a 1,001. Apesar da diferença no procedimento de determinação desses dois módulos, os seus valores não se diferem. Portanto, a análise dos resultados, apresentada a seguir, será baseada nos resultados do módulo de elasticidade estático secante, determinado de acordo com a norma brasileira NBR 8522.

5.2 Evolução das Propriedades Mecânicas

5.2.1 Considerações Preliminares

Neste item, será estudada a evolução da resistência à compressão, do módulo de elasticidade secante e da resistência à tração dos concretos investigados. Primeiramente, procurar-se-á analisar a evolução das propriedades estudadas para concretos de diferentes traços. Em seguida, será analisada, para cada traço, a variação com o tempo das três propriedades. Ou seja, procura-se-á averiguar se, em um mesmo concreto, propriedades mecânicas distintas, apresentam evoluções distintas.

5.2.2 Estudo da Evolução das Propriedades Mecânicas

Os resultados obtidos para a resistência à compressão, apresentados na Tabela 4.1, podem ser visualizados, graficamente, na Figura 5.1.

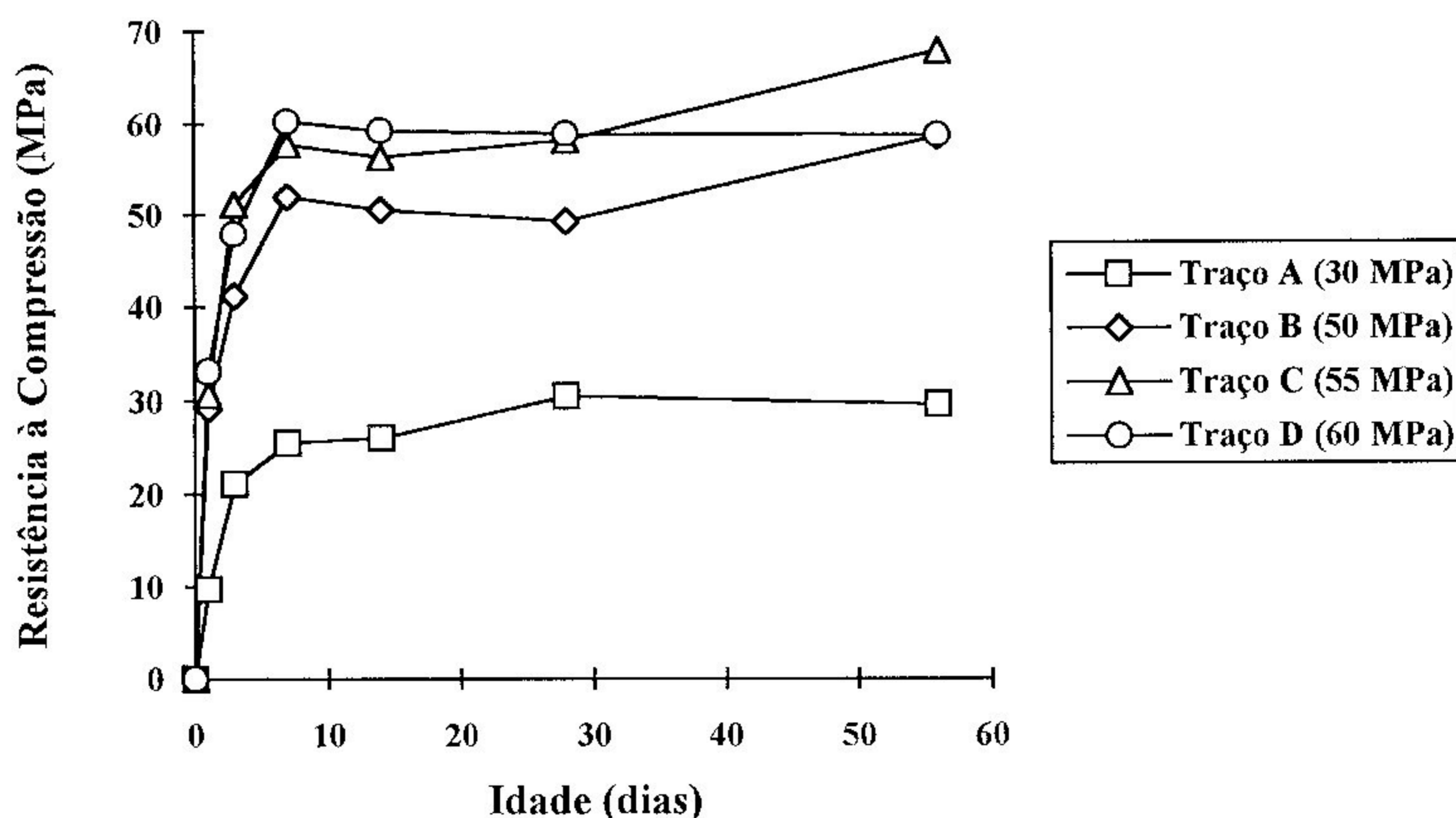


Figura 5.1 - Resistência à compressão x idade

Para se realizar uma análise comparativa da evolução da resistência à compressão, tomou-se, como referência, o seu valor obtido na idade de 28 dias. Os resultados, assim determinados, encontram-se apresentados na Tabela 5.2. A Figura 5.2 ilustra, graficamente, esses mesmos resultados.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos para a resistência à compressão (% 28 dias)

Idade (dias)	Traço A (30 MPa)		Traço B (50 MPa)		Traço C (55 MPa)		Traço D (60 MPa)	
	f_c (MPa)	% (f_c) ₂₈	f_c (MPa)	% (f_c) ₂₈	f_c (MPa)	% (f_c) ₂₈	f_c (MPa)	% (f_c) ₂₈
1	9,7	32	29,2	59	30,7	53	33,1	56
3	21,1	69	41,2	83	51,2	88	47,9	81
7	25,5	84	52,0	105	57,7	99	60,2	102
14	26,0	85	50,5	102	56,3	97	59,2	101
28	30,5	100	49,3	100	58,1	100	58,9	100
56	29,6	97	58,5	119	67,9	117	58,7	100

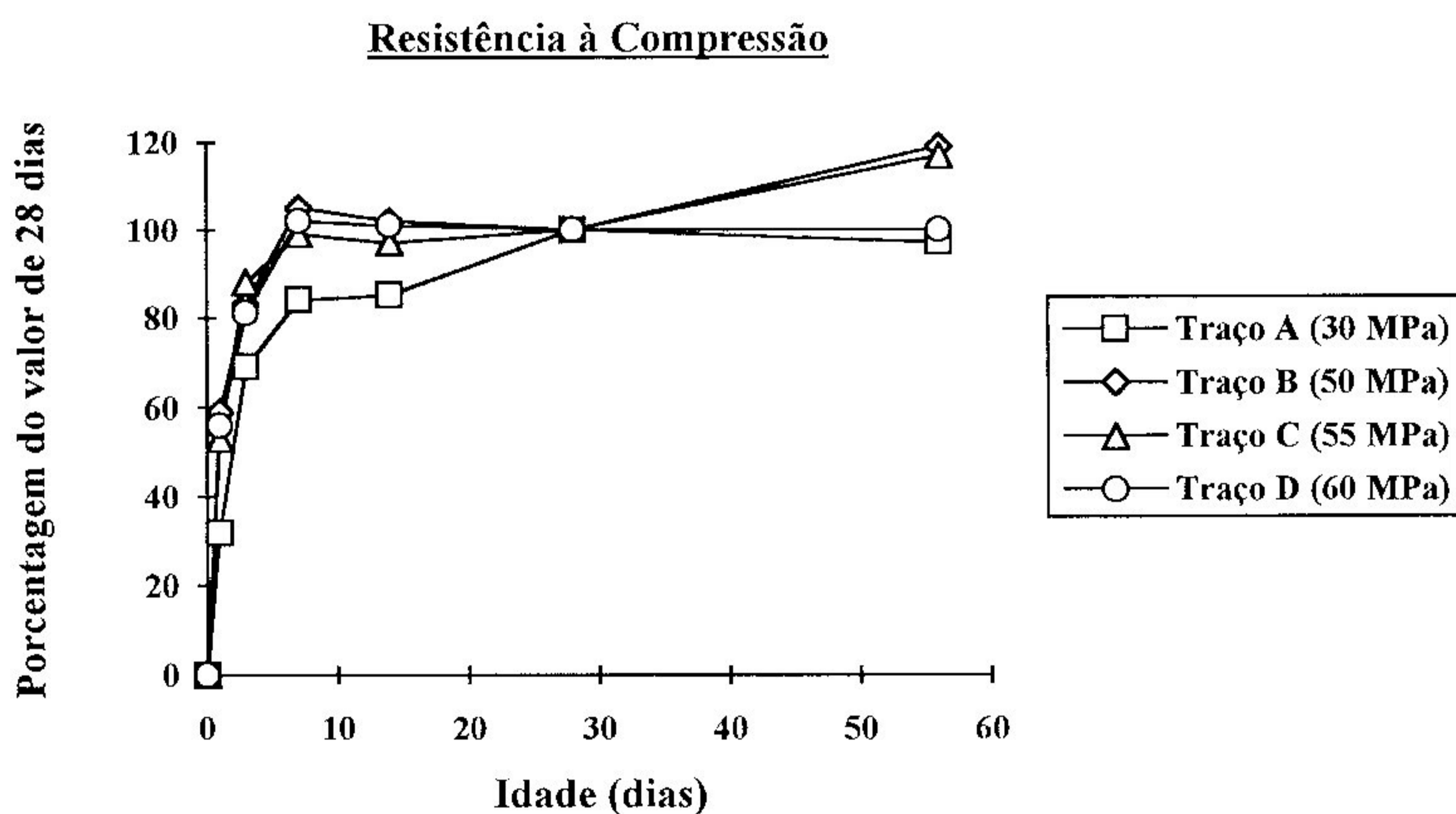


Figura 5.2 - Resistência à compressão (% 28 dias) x idade

Para a resistência à compressão, na idade de 1 dia, os traços B, C e D apresentaram um valor médio correspondente a 56% do valor obtido na idade de 28 dias. Na idade de 3 dias, esse valor subiu, na média, para 84%. Dos 7 aos 28 dias, o valor da resistência permaneceu, praticamente, inalterado. Na idade de 56 dias, a resistência à compressão dos traços B e C cresceu cerca de 18% em relação à idade de 28 dias; já no traço D, não houve alteração para este mesmo período. Observa-se, portanto, que a evolução da resistência à compressão apresentou um comportamento bastante semelhante, até a idade de 28 dias, nos 3 concretos de alta resistência. Por outro lado, a resistência à compressão do traço A apresentou uma variação com o tempo diferente dos demais traços: na idade de 1 dia, o valor obtido para a resistência à compressão foi 32% do valor obtido na idade de 28 dias; na idade de 3 dias, este valor subiu para 69%. No período compreendido entre as idades de 7 e 14 dias, o valor da resistência permaneceu inalterado em 85% do valor obtido aos 28 dias. Entre as idades de 28 e 56 dias, o seu valor também manteve-se, praticamente, constante. Constata-se, então, que, nas idades inferiores a 28 dias, a resistência à compressão de concretos de alta resistência, fabricados com cimento de alta resistência inicial, evoluiu diferentemente da resistência dos concretos de resistência normal. Nessas idades, aqueles concretos apresentaram um crescimento da resistência mais rápido que o apresentado pelo concreto de resistência normal.

Os resultados dos ensaios realizados por Parrot, em 1969 [16] [17] [18], também confirmam o que foi observado acima. A relação da resistência à compressão entre as idades de 7 e 28 dias foi maior para concretos de alta resistência do que para concretos de resistência normal. A relação obtida para aqueles concretos ficou na faixa de 0,8 a 0,9 enquanto que, para os concretos de resistência normal, essa relação caiu para 0,7 a 0,75. Essas relações apresentaram-se ligeiramente inferiores às apresentadas neste trabalho porém, deve-se ressaltar que, na fabricação dos concretos estudados por Parrot, foi empregado cimento comum. Conclusão semelhante foi observada por Carrasquillo [10]: a baixas idades, os concretos de alta resistência, fabricados com cimento comum, apresentaram uma taxa de crescimento da resistência à compressão maior que os concretos de resistência normal, também fabricados com cimento comum. Para a resistência à compressão de concretos produzidos com cimento comum, na idade de 3 dias, Oluokun [31] obteve os seguintes percentuais, em relação à idade de 28 dias: 75% para concretos de alta resistência; 65% para concretos de resistência média e, finalmente, 51% para

concretos de resistência normal. Os valores obtidos na idade de 7 dias foram 82%, 77% e 66% para concretos de resistência alta, média e normal, respectivamente.

Analogamente, os resultados apresentados na Tabela 4.2, referentes aos valores do módulo de elasticidade obtidos nas diferentes idades, para cada traço, podem ser visualizados, graficamente, na Figura 5.3, a seguir.

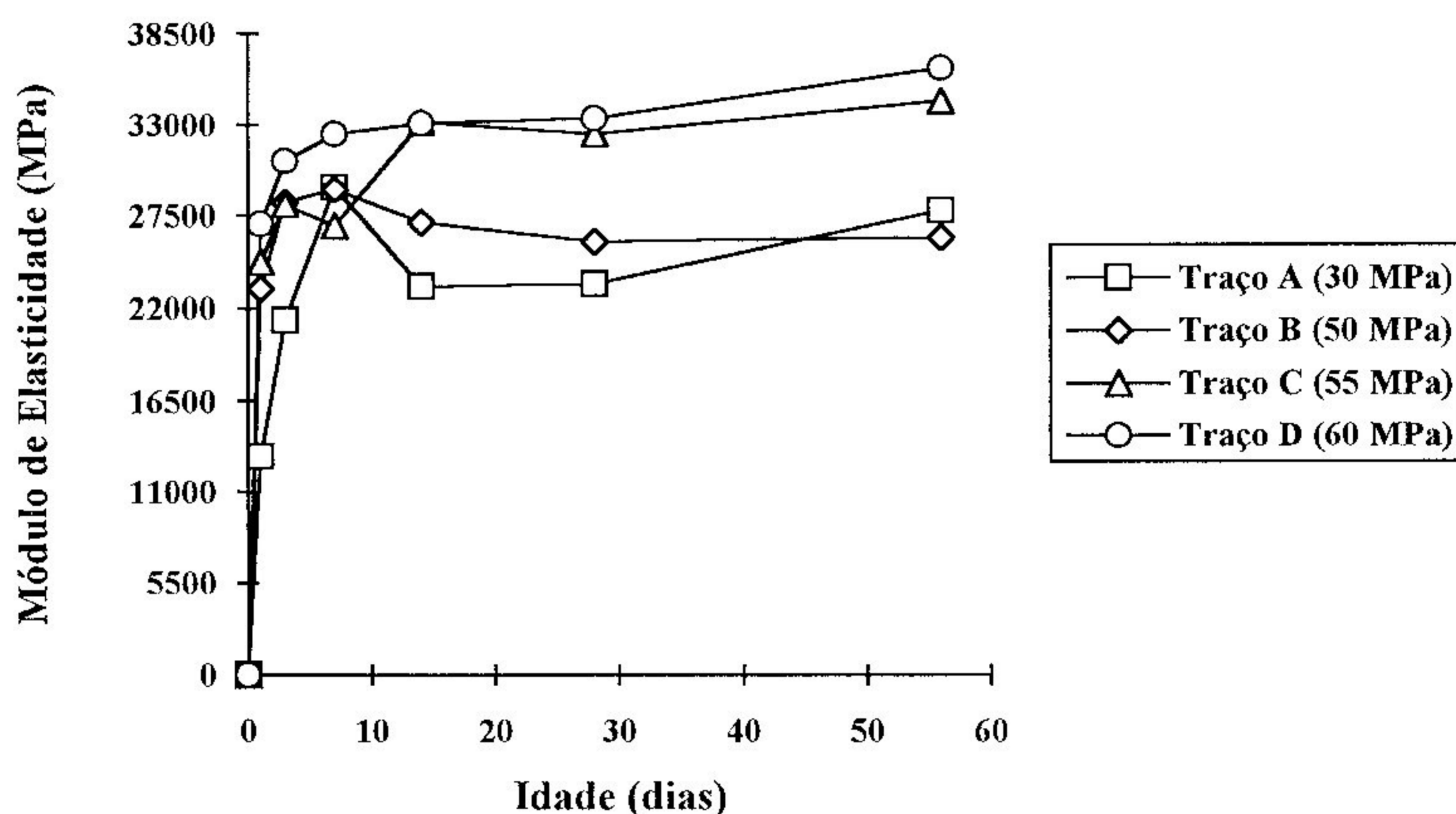


Figura 5.3 - Módulo de elasticidade x idade

Na Tabela 5.3 encontram-se apresentados, para cada traço, os valores calculados para o módulo de elasticidade, nas diferentes idades, tomando-se, como valor de referência, o resultado obtido na idade de 28 dias. Os resultados, assim determinados, podem ser visualizados, graficamente, na Figura 5.4.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos para o módulo de elasticidade (% 28 dias)

Idade (dias)	Traço A (30 MPa)		Traço B (50 MPa)		Traço C (55 MPa)		Traço D (60 MPa)	
	E_c (MPa)	% (E_c) ₂₈	E_c (MPa)	% (E_c) ₂₈	E_c (MPa)	% (E_c) ₂₈	E_c (MPa)	% (E_c) ₂₈
1	13137	56	23192	89	24753	76	27006	81
3	21331	91	28265	109	28127	87	30788	92
7	29186	125	29080	112	26875	83	32440	97
14	23305	99	27109	105	33145	102	33066	99
28	23434	100	25933	100	32433	100	33381	100
56	27801	119	26213	101	34421	106	36437	109

Módulo de Elasticidade

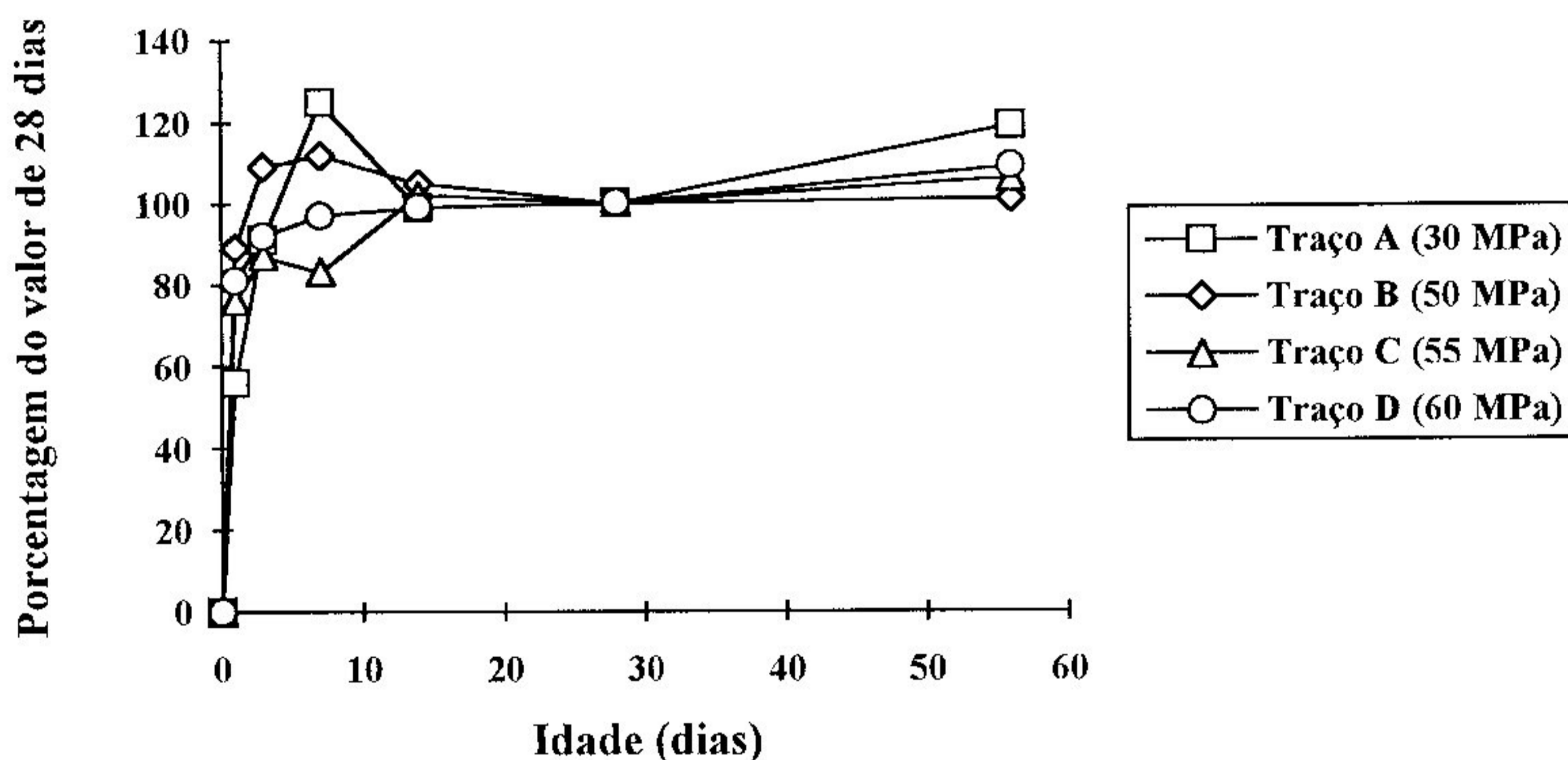


Figura 5.4 - Módulo de elasticidade (% 28 dias) x idade

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.3, observa-se que o valor do módulo de elasticidade obtido para o traço A e para o traço C, na idade de 7 dias, não corresponde aos valores esperados. Comparando-se os resultados obtidos nesta idade, para os quatro concretos estudados, constatou-se uma grande discrepância desses valores em relação à idade de 3 dias: os traços B e D apresentaram um crescimento médio de 4%; para o traço A, esse valor foi de 37%, enquanto uma queda de 4% foi observada para o traço C. Diante dessas

observações, optou-se por analisar a evolução do módulo de elasticidade eliminando-se os resultados obtidos na idade de 7 dias.

Na idade de 1 dia, os traços B, C e D apresentaram um valor médio correspondente a 82% do valor obtido aos 28 dias. Esse valor médio observado para os concretos de alta resistência apresentou-se bastante superior ao valor de 56%, obtido para o traço A, correspondente ao concreto de resistência normal. Porém, nas idades de 3 e 14 dias, praticamente nenhuma diferença na evolução do módulo de elasticidade foi observada entre os quatro concretos investigados. Nessas idades, o traço A apresentou valores correspondentes a 91% e 99% do valor obtido na idade de 28 dias, respectivamente. Os valores médios encontrados para os traços B, C e D foram iguais a 96% e 102%, respectivamente. No período compreendido entre as idades de 28 dias e 56 dias, os valores do módulo de elasticidade cresceram em todos os traços. Entretanto, o traço A apresentou um crescimento muito maior, se comparado ao crescimento observado nos demais traços: 19% do valor obtido aos 28 dias contra apenas 5%, em média, apresentado pelos traços B, C e D.

Para concretos de alta resistência, fabricados com cimento comum, Oluokun [31] obteve, nas idades de 3 e 7 dias, percentuais de 88% e 90%, respectivamente. Para os concretos de resistência média, esses valores foram, respectivamente, iguais a 82% e 90%. Finalmente, o módulo de elasticidade de concretos de resistência normal apresentou os seguintes percentuais, em relação à idade de 28 dias: 70%, na idade de 3 dias, e 78%, na idade de 7 dias. Observa-se, portanto que, o módulo de elasticidade de concretos fabricados com cimento de alta resistência inicial apresentaram taxas de crescimento superiores à dos concretos fabricados com cimento comum. Comparando-se os resultados obtidos na idade de 3 dias, o módulo de elasticidade de concretos de alta resistência, produzidos com cimento de alta resistência inicial, apresentou uma taxa de crescimento cerca de 10% superior à apresentada por concretos de alta resistência, porém fabricados com cimento comum. O mesmo foi observado para os concretos de resistência normal, porém essa relação foi de 30%.

A Figura 5.5, apresentada a seguir, ilustra, graficamente os resultados obtidos para a resistência à tração, apresentados na Tabela 4.4, do capítulo anterior.

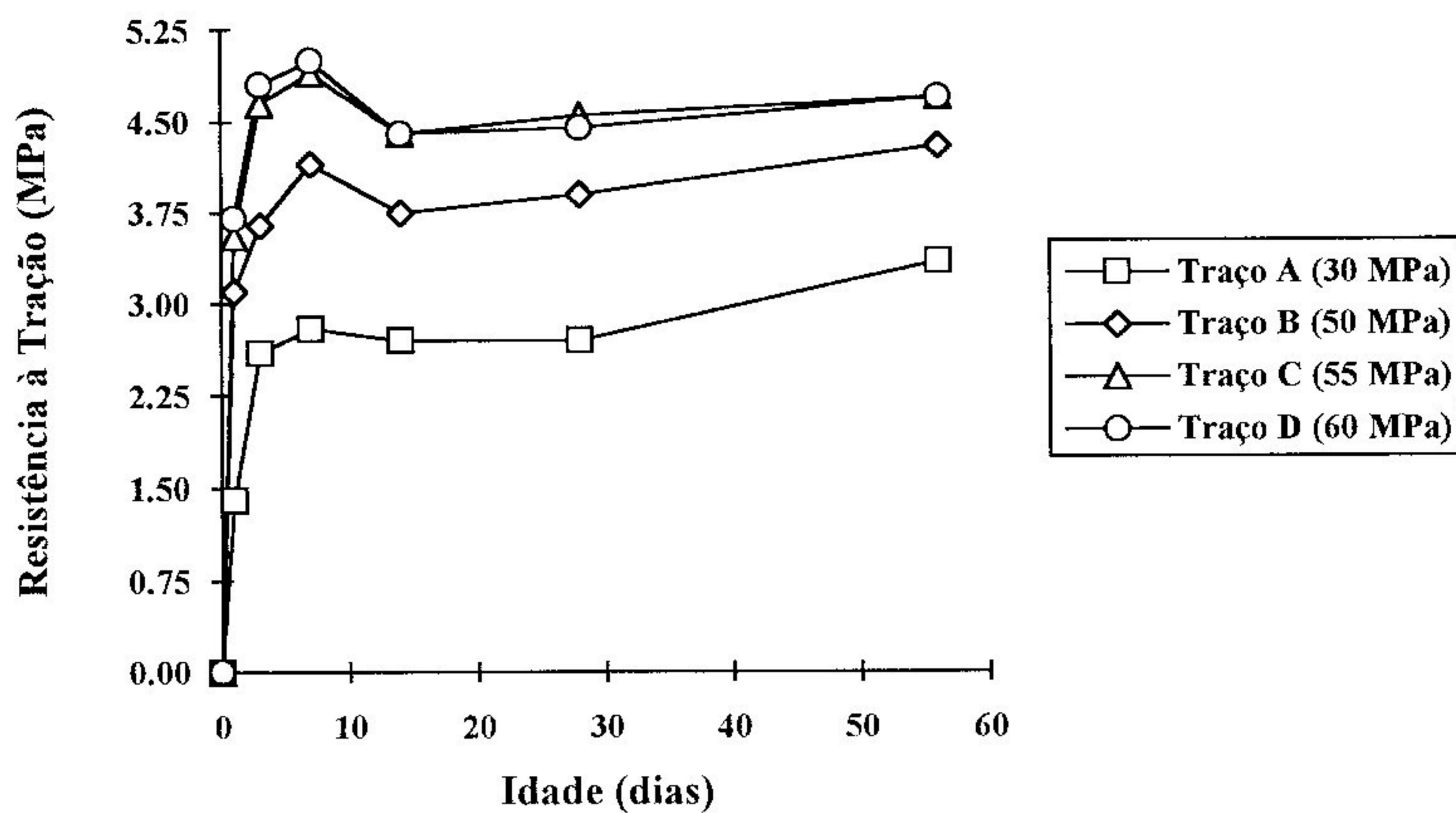


Figura 5.5 - Resistência à tração x idade

Semelhantemente ao estudo realizado para a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, os resultados obtidos para a resistência à tração foram comparados com o valor obtido na idade de 28 dias. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 5.4, a seguir, e ilustrados na Figura 5.6.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos para a resistência à tração (% 28 dias)

Idade (dias)	Traço A (30 MPa)		Traço B (50 MPa)		Traço C (55 MPa)		Traço D (60 MPa)	
	f_t (MPa)	% (f_t) ₂₈	f_t (MPa)	% (f_t) ₂₈	f_t (MPa)	% (f_t) ₂₈	f_t (MPa)	% (f_t) ₂₈
1	1,40	52	3,10	80	3,55	78	3,70	83
3	2,60	96	3,65	94	4,65	102	4,80	108
7	2,80	104	4,15	106	4,90	108	5,00	112
14	2,70	100	3,75	96	4,40	97	4,40	99
28	2,70	100	3,90	100	4,55	100	4,45	100
56	3,35	124	4,30	110	4,70	103	4,70	106

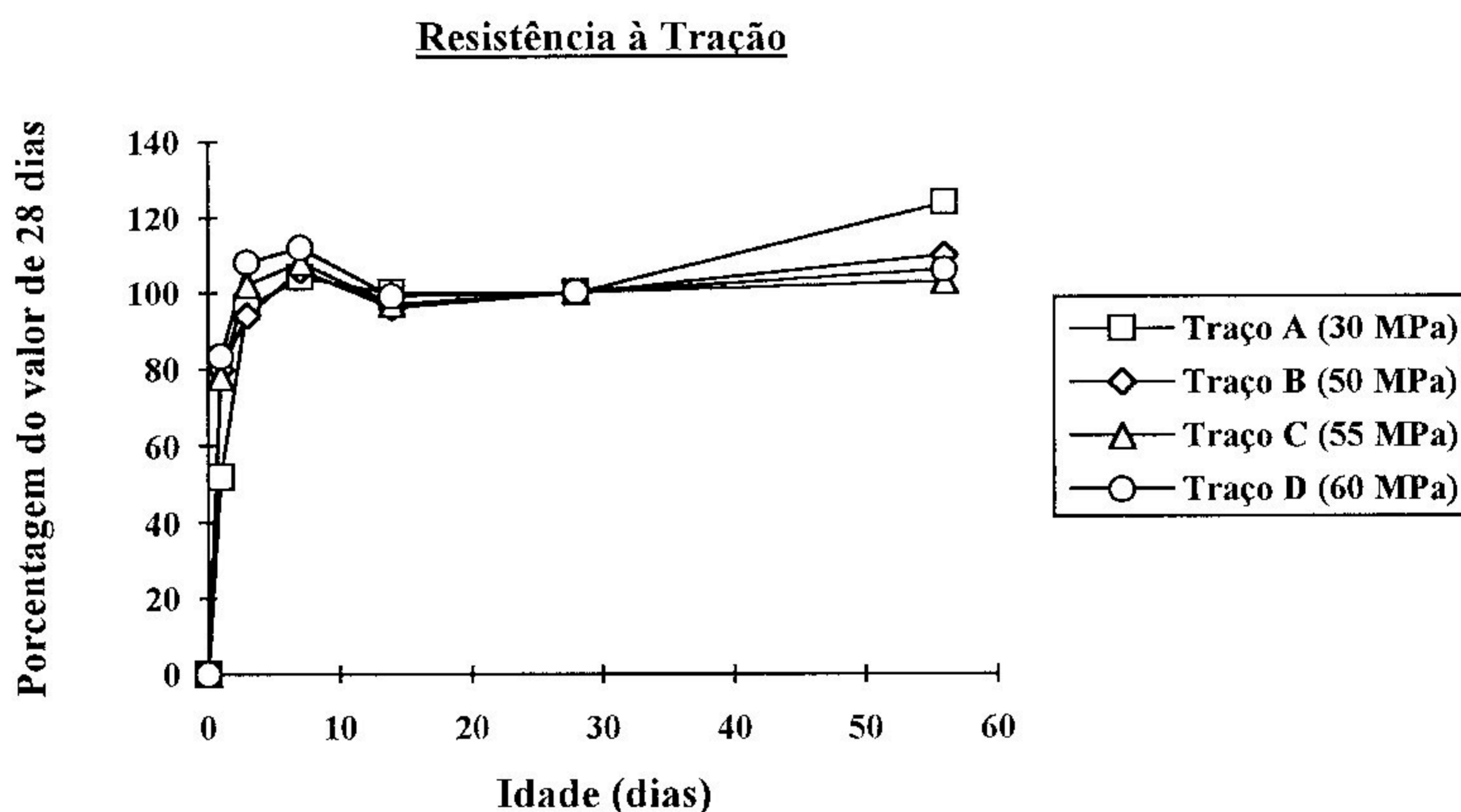


Figura 5.6 - Resistência à tração (% 28 dias) x idade

Analisando-se a Tabela 5.4 e a Figura 5.6, observa-se que, na idade de 1 dia, os traços B, C e D apresentaram um valor médio correspondente a 80% do valor obtido na idade de 28 dias. Em contrapartida, o traço A apresentou um valor bastante inferior: 52% do valor obtido aos 28 dias. A partir dos 3 dias, até a idade de 28 dias, os resultados indicam um comportamento muito semelhante nos quatro traços. Para os traços B, C e D, valores médios correspondentes a 101%, 109% e 97% do valor obtido na idade de 28 dias foram encontrados,

respectivamente, nas idades de 3, 7 e 14 dias. Os respectivos valores encontrados para o traço A foram iguais a 96%, 104% e 100%. Esses resultados revelam que a resistência à tração dos concretos estudados apresentou uma ligeira queda entre as idades de 7 dias e 28 dias: 4%, para o traço A e 9%, em média, para os demais traços. A partir da idade de 28 dias, os valores da resistência à tração voltaram a crescer porém, com maior intensidade no traço A: 24% contra apenas 6%, em média, nos traços B, C e D.

Novamente, cabe aqui ressaltar os resultados de Parrot [16] [17] [18], obtidos para concretos fabricados com cimento comum. A resistência à tração, quando avaliada pelo ensaio de compressão diametral, apresentou relações médias entre as idades de 7 e 28 dias iguais a 0,9 e 0,8, para concretos de alta resistência e para concretos de resistência normal, respectivamente. Essas relações também foram determinadas por Oluokun [31], nas idades de 3 e 7 dias. Para concretos de alta resistência, na idade de 3 dias, o valor da resistência à tração foi igual a 79% do valor obtido aos 28 dias. Na idade de 7 dias, esse percentual subiu para 82%. Os concretos de resistência média apresentaram os seguintes percentuais: 70%, na idade de 3 dias, e 85%, na idade de 7 dias. Finalmente, esses valores para os concretos de resistência normal foram iguais a 61% e 67%, nas idades de 3 e 7 dias, respectivamente. Mais uma vez, observa-se que a resistência à tração evolui diferentemente em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento: dentro de uma determinada faixa de resistência à compressão, concretos fabricados com cimento de alta resistência inicial apresentaram um crescimento na resistência à tração mais rápido que os concretos fabricados com cimento comum. Na idade de 3 dias, por exemplo, os percentuais obtidos no presente trabalho para concretos de alta resistência, fabricados com cimento de alta resistência inicial, foram cerca de 28% maiores que os obtidos por Oluokun, em cujos concretos foi empregado cimento comum. Para os concretos de resistência normal, esse percentual subiu para 57%. Adicionalmente, comparando-se esses percentuais com aqueles obtidos para o módulo de elasticidade, observa-se que essa diferença entre a evolução das propriedades mecânicas dos concretos fabricados com cimento de alta resistência inicial e a dos concretos fabricados com cimento comum é mais acentuada para a resistência à tração, determinada por compressão diametral.

Uma análise geral da evolução das propriedades investigadas neste trabalho revela que os concretos fabricados com cimento Portland de alta

resistência inicial, em cujos traços empregou-se um consumo mais elevado de cimento, associado a um baixo fator água/cimento, apresentaram uma sensível melhoria nas suas propriedades mecânicas. Entretanto, constata-se que essa melhoria não se reflete de maneira semelhante nas três propriedades. Observando-se a Figura 5.1, constata-se que, em todas as idades, os valores da resistência à compressão dos traços B, C e D apresentaram-se superiores aos apresentados pelo traço A cerca de 60% ou mais. Entretanto, ao se analisar as Figuras 5.3 e 5.5, respectivamente correspondentes ao módulo de elasticidade e à resistência à tração, observa-se que essas propriedades não apresentaram, proporcionalmente, o mesmo aumento em seus valores, nas diversas idades. Este fato sugere que a relação entre essas propriedades e a resistência à compressão não é uma relação diretamente proporcional. A observância desse fato é de suma importância para a análise da correlação entre as propriedades mecânicas.

Adicionalmente, comparando-se, simultaneamente, as Figuras 5.2, 5.4 e 5.6, observa-se que a resistência à compressão do traço A apresentou valores relativos à idade de 28 dias sempre inferiores aos valores correspondentes dos traços B, C e D, em todas as idades. Para o módulo de elasticidade e para a resistência à tração, este fato foi observado somente na idade de 1 dia. Portanto, constata-se que, nas primeiras 24 horas, essas propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência, fabricados com cimento de alta resistência inicial, evoluem mais rapidamente em relação a concretos de resistência normal, também fabricados com cimento de alta resistência inicial.

Um outro aspecto interessante é que, de uma maneira geral, entre os concretos de alta resistência, o traço C apresentou melhores resultados que os traços B e D. Curiosamente, na fabricação daquele traço, utilizou-se um menor consumo de cimento. Este fato sugere que um consumo de cimento acima de 600 kg/m³ não reflete em melhorias nas propriedades dos concretos.

Uma vez constatado que cada uma das propriedades mecânicas investigadas evoluem diferentemente, em função do traço, procurou-se comparar a evolução dessas mesmas propriedades entre si. Em outras palavras, para cada um dos traços estudados, procurou-se avaliar a variação com o tempo da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da resistência à tração. Os valores das Tabelas 5.2 a 5.4 foram, novamente, utilizados para a realização

deste estudo comparativo. As Figuras 5.7 a 5.10, ilustram, graficamente, os resultados.

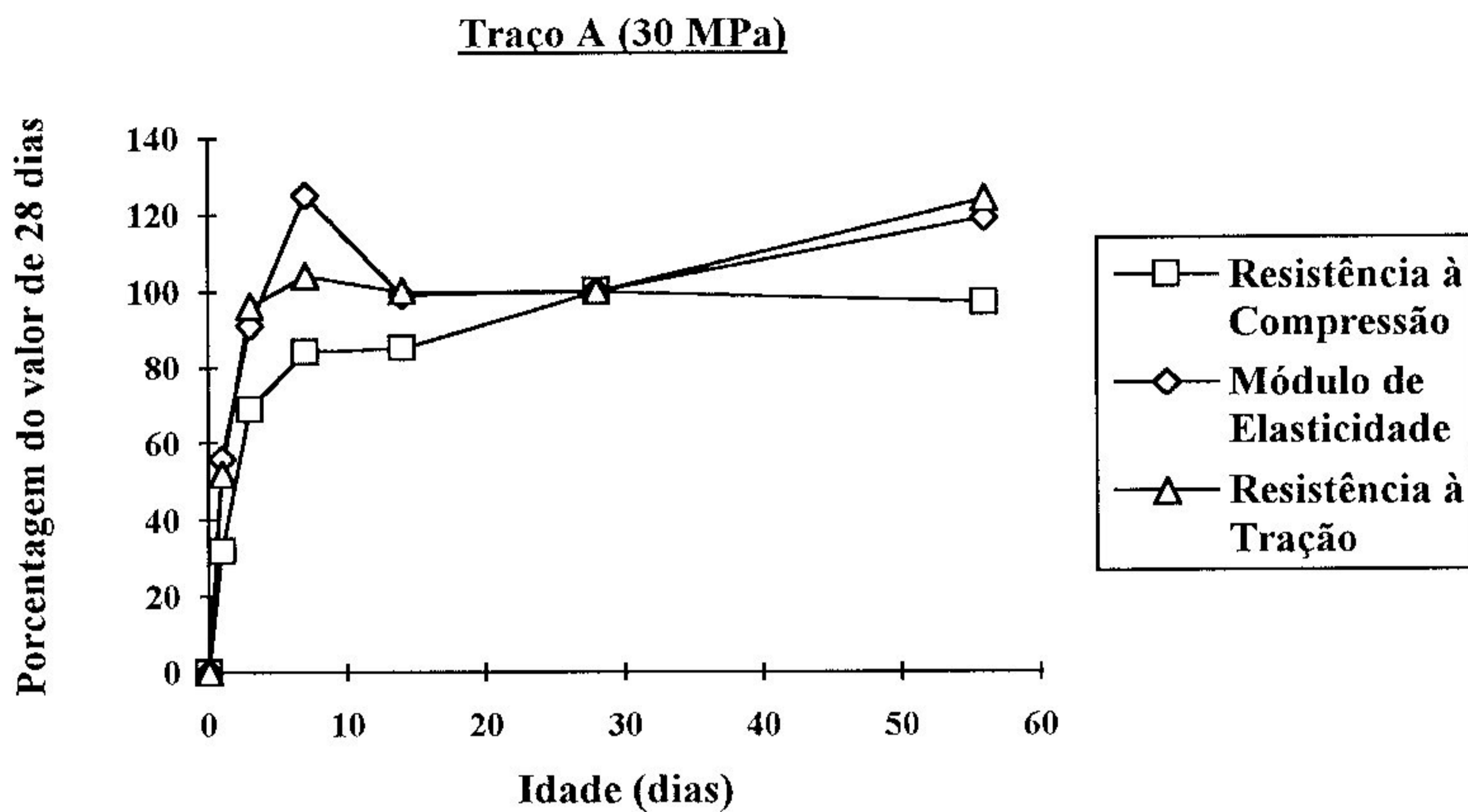


Figura 5.7 - Propriedades mecânicas do traço A (% 28 dias) x idade

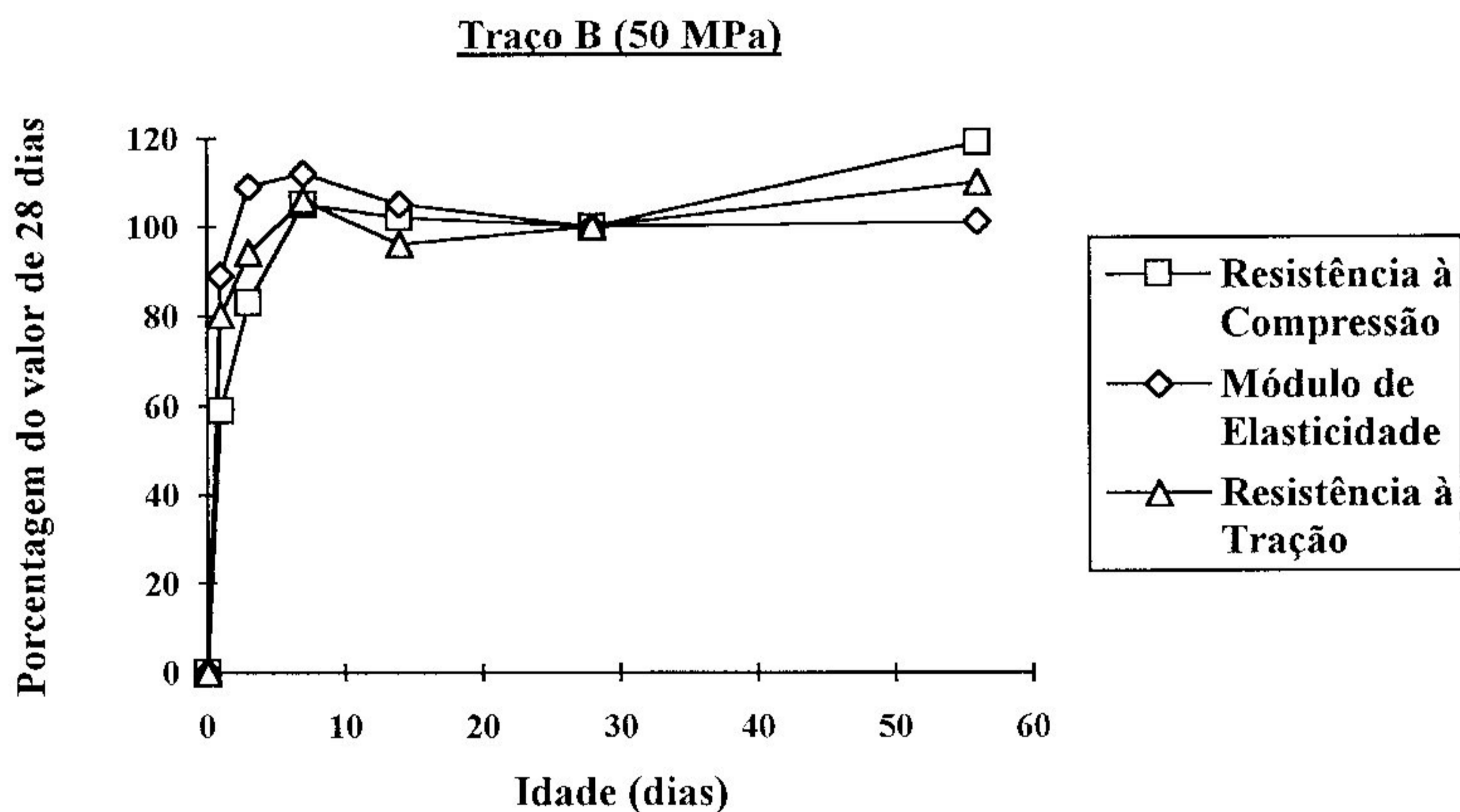


Figura 5.8 - Propriedades mecânicas do traço B (% 28 dias) x idade

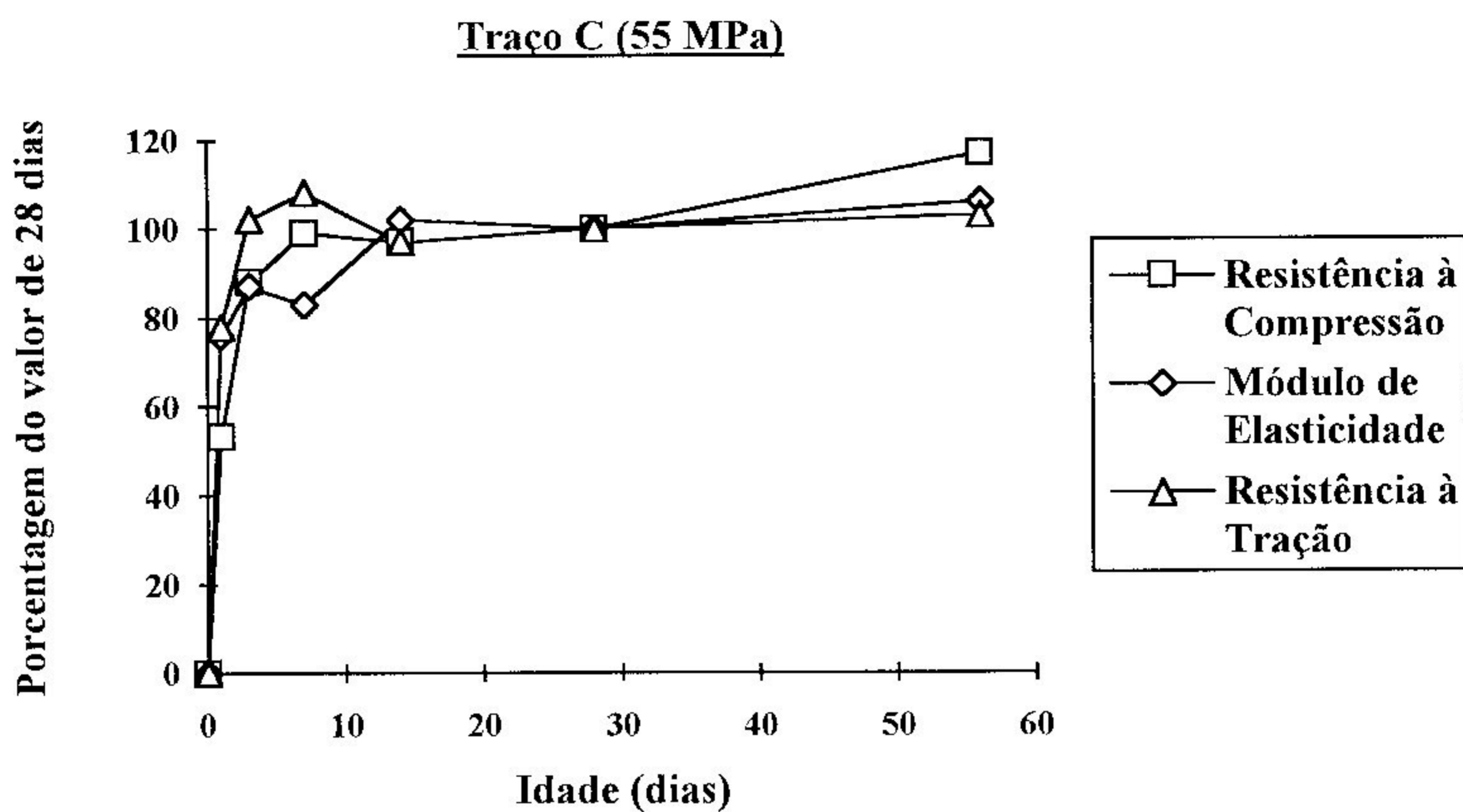


Figura 5.9 - Propriedades mecânicas do traço C (% 28 dias) x idade

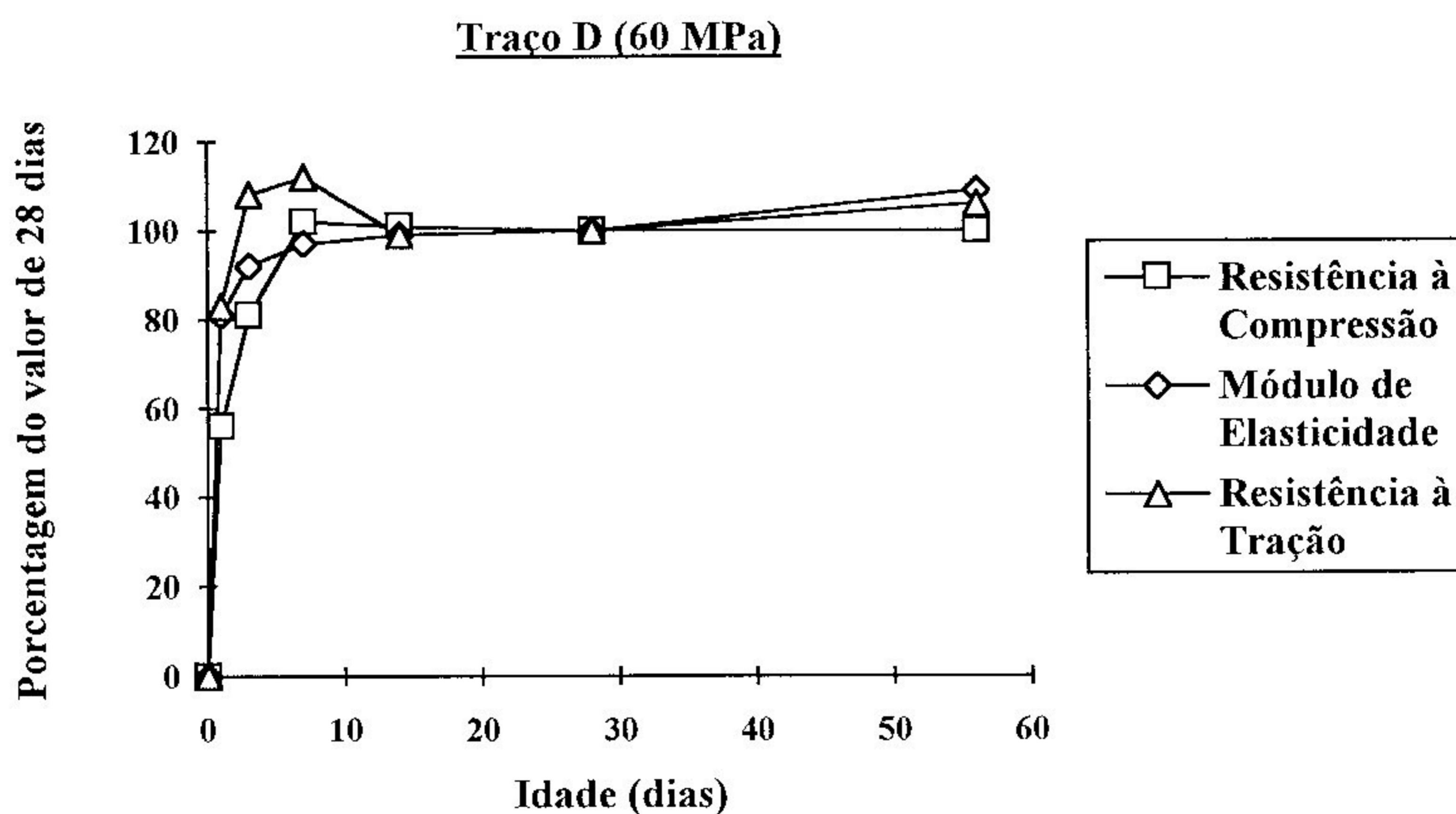


Figura 5.10 - Propriedades mecânicas do traço D (% 28 dias) x idade

Observando-se a Figura 5.7, constata-se que, em todas as idades, a resistência à compressão do traço A apresentou valores relativos à idade de 28 dias sempre inferiores aos apresentados pelo módulo de elasticidade e pela resistência à tração. Com exceção da idade de 7 dias, essas duas propriedades apresentaram evoluções bastante semelhantes.

As Figuras 5.8 a 5.10, correspondentes aos traços dos concretos de alta resistência, revelam que a evolução das propriedades mecânicas não se apresentou de forma tão diferenciada como a apresentada pelo traço A. Entretanto, pode-se observar nesses traços que, na idade de 1 dia, a taxa de crescimento para o módulo de elasticidade e para a resistência à tração é sempre maior que para a resistência à compressão.

Portanto, de uma maneira global, pode-se ressaltar o fato de que, nas primeiras 24 horas, as diferentes propriedades mecânicas de concretos fabricados com cimento de alta resistência inicial apresentam taxas de crescimento distintas, sendo que o módulo de elasticidade e a resistência à tração evoluem mais rapidamente que a resistência à compressão.

Lew e Reichard [20] e Oluokun [31], empregando cimento comum na fabricação dos concretos, obtiveram resultados diferentes dos obtidos no presente trabalho. Lew e Reichard constataram que, nas idades inferiores a 28 dias, a taxa de crescimento da resistência à tração, é aproximadamente a mesma da resistência à compressão enquanto que, a taxa de crescimento do módulo de elasticidade é ligeiramente maior que a da resistência à compressão. Por outro lado, Oluokun observou que, nos primeiros 3 dias, o módulo de elasticidade apresentou o crescimento mais rápido, enquanto que a taxa de crescimento da resistência à tração foi apenas ligeiramente superior a da resistência à compressão. Adicionalmente, ele observou que, quanto mais rápido é o crescimento de uma determinada propriedade mecânica às baixas idades, mais lento será o seu crescimento nas idades mais avançadas.

5.3 Correlações entre as Propriedades Mecânicas

5.3.1 Considerações Preliminares

Na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 foram discutidas várias equações para relacionar a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, e o módulo de elasticidade estático secante com a resistência à compressão uniaxial dos concretos.

As expressões de correlação entre essas propriedades mecânicas, citadas nas várias normas, foram baseadas, na sua grande maioria, em resultados experimentais de ensaios realizados com concretos de resistência à compressão uniaxial inferior a 40 MPa, na idade de 28 dias. Entretanto, nos últimos anos, os avanços na tecnologia dos materiais resultaram na viabilidade de produção de concretos com resistências à compressão superiores a 40 MPa. Nessa etapa atual de desenvolvimento da tecnologia do concreto, não só as características dos materiais, até então utilizados, começaram a variar mas, também, novos materiais passaram a ser empregados, como é o caso dos aditivos, da microssílica e das cinzas volantes. Esforços foram, então, realizados com o objetivo de se avaliar a aplicabilidade de algumas relações de normas, não somente aos concretos de resistência à compressão mais elevada mas, também, a idades inferiores a 28 dias. Em geral, observou-se que aquelas relações de norma não mais correspondiam aos valores obtidos experimentalmente e, então, diversos autores propuseram novas expressões que relacionassem as propriedades mecânicas com mais precisão.

Neste item, procurar-se-á estabelecer uma função matemática simples que melhor relacione as propriedades mecânicas estudadas neste trabalho. Serão empregadas a teoria e a formulação do método dos mínimos quadrados descritas, de forma simplificada, no Apêndice B. Para a elaboração desse apêndice, foram consultadas as referências bibliográficas [44] e [45]. Uma vez determinada a equação da curva que melhor se adeque aos resultados do presente trabalho, será avaliado então, o grau de ajustamento dessa equação aos resultados de pesquisas experimentais realizadas por alguns pesquisadores citados no Capítulo 2. As equações propostas pelas normas brasileira, americana e europeia serão também utilizadas nesse estudo comparativo.

É importante esclarecer que o objetivo aqui não é propor novas equações para a norma brasileira mas, apenas avaliar a aplicabilidade das expressões da atual norma de projetos e execução de obras de concreto armado aos concretos de alta resistência à compressão e a baixas idades. Conseqüentemente, objetiva-se também alertar os profissionais ligados à construção civil, especialmente aqueles que empregam o concreto em suas estruturas, que a utilização das expressões da norma brasileira, além dos limites dentro dos quais elas foram estabelecidas, deve ser feita com extrema cautela, até que uma revisão desta norma venha atualizar a mesma à nova realidade do emprego dos concretos de alta resistência em nossas estruturas.

5.3.2 Correlação entre o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão

O objetivo deste item é investigar a relação existente entre o módulo de elasticidade estático secante e a resistência à compressão uniaxial. Os dados para essa investigação foram apresentados, anteriormente, no Capítulo 4 e são reproduzidos na Tabela 5.5.

Como foi constatado no item 5.2.2, a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão não é uma relação diretamente proporcional. Assim, para cada traço, procurou-se investigar relações do tipo $E_c = A + B f_c$ e $E_c = A + B (f_c)^C$. O modelo linear foi escolhido em função da sua simplicidade. Para o segundo modelo, pré-fixou-se o valor da constante C como sendo igual a 0,5 em função, não somente da praticidade desta potência mas, também, devido ao fato de se encontrar em diversas normas, inclusive na norma brasileira, expressões relacionando o módulo de elasticidade com a raiz quadrada da resistência à compressão. Adicionalmente, vários pesquisadores confirmaram em seus estudos a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão elevada à potência 0,5. Nos modelos propostos neste estudo, E_c é a variável dependente (equivalente à variável Y, do Apêndice B), f_c e $\sqrt{f_c}$ são as variáveis independentes (ambas equivalentes à variável X, do Apêndice B) e A e B são constantes a serem determinadas, definidas como os parâmetros do modelo proposto.

Tabela 5.5 - Tabela geral dos resultados da resistência à compressão e do módulo de elasticidade

Traço (f_c esperado)	Idade (dias)	f_c (MPa)	E_c (MPa)
A (30 MPa)	1	9,7	13137
	3	21,1	21331
	7	25,5	29186
	14	26,0	23305
	28	30,5	23434
	56	29,6	27801
B (50 MPa)	1	29,2	23192
	3	41,2	28265
	7	52,0	29080
	14	50,5	27109
	28	49,3	25933
	56	58,5	26213
C (55 MPa)	1	30,7	24753
	3	51,2	28127
	7	57,7	26875
	14	56,3	33145
	28	58,1	32433
	56	67,9	34421
D (60 MPa)	1	33,1	27006
	3	47,9	30788
	7	60,2	32440
	14	59,2	33066
	28	58,9	33381
	56	58,7	36437

Conforme está descrito no Apêndice B, os valores dos parâmetros A e B são determinados pelo método dos mínimos quadrados. Esses parâmetros A e B, bem como os coeficientes de correlação R e os desvios padrão s da estimativa de E_c para f_c (ou $\sqrt{f_c}$) foram determinados, individualmente, para cada traço. Os resultados desta análise estatística estão apresentados na Tabela 5.6, e podem ser visualizados, graficamente, nas Figuras 5.11 a 5.18.

Tabela 5.6 - Parâmetros estatísticos associados aos modelos que relacionam o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, para cada traço

Traço	$E_c = A + B f_c$				$E_c = A + B \sqrt{f_c}$			
	A	B	R	s	A	B	R	s
A (30 MPa)	7970	635	0,85	3313	-3568	5539	0,87	3154
B (50 MPa)	21353	113	0,56	1917	16162	1540	0,59	1869
C (55 MPa)	16563	250	0,80	2626	5600	3348	0,79	2686
D (60 MPa)	18582	257	0,88	1653	6945	3485	0,88	1648

OBS: Nesta tabela, a notação empregada é:

A - intercepto da reta;

B - coeficiente angular da reta;

R - coeficiente de correlação; e

s - desvio padrão da estimativa de E_c para f_c (ou $\sqrt{f_c}$).

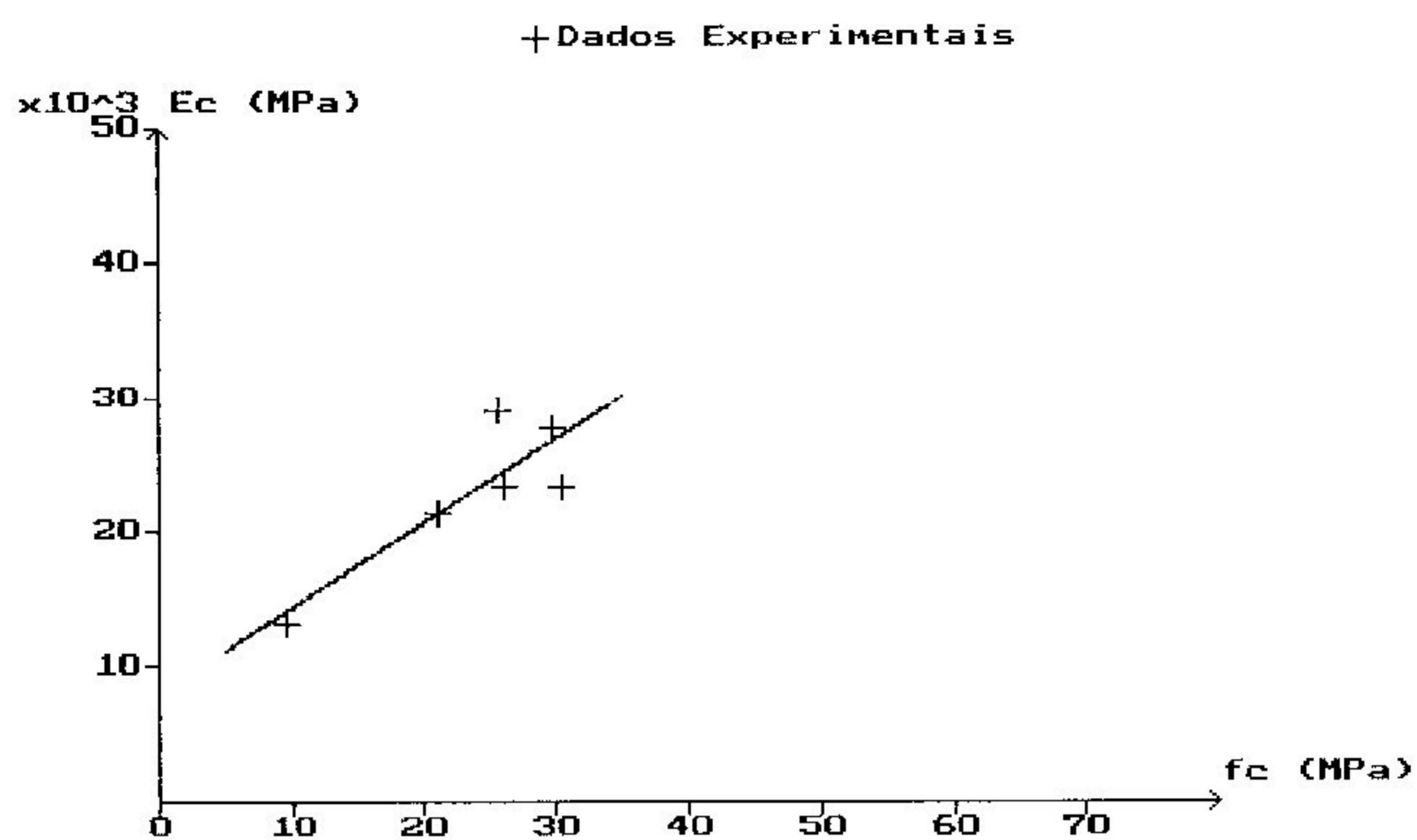


Figura 5.11 - Módulo de elasticidade x resistência à compressão
Traço A (30 MPa)

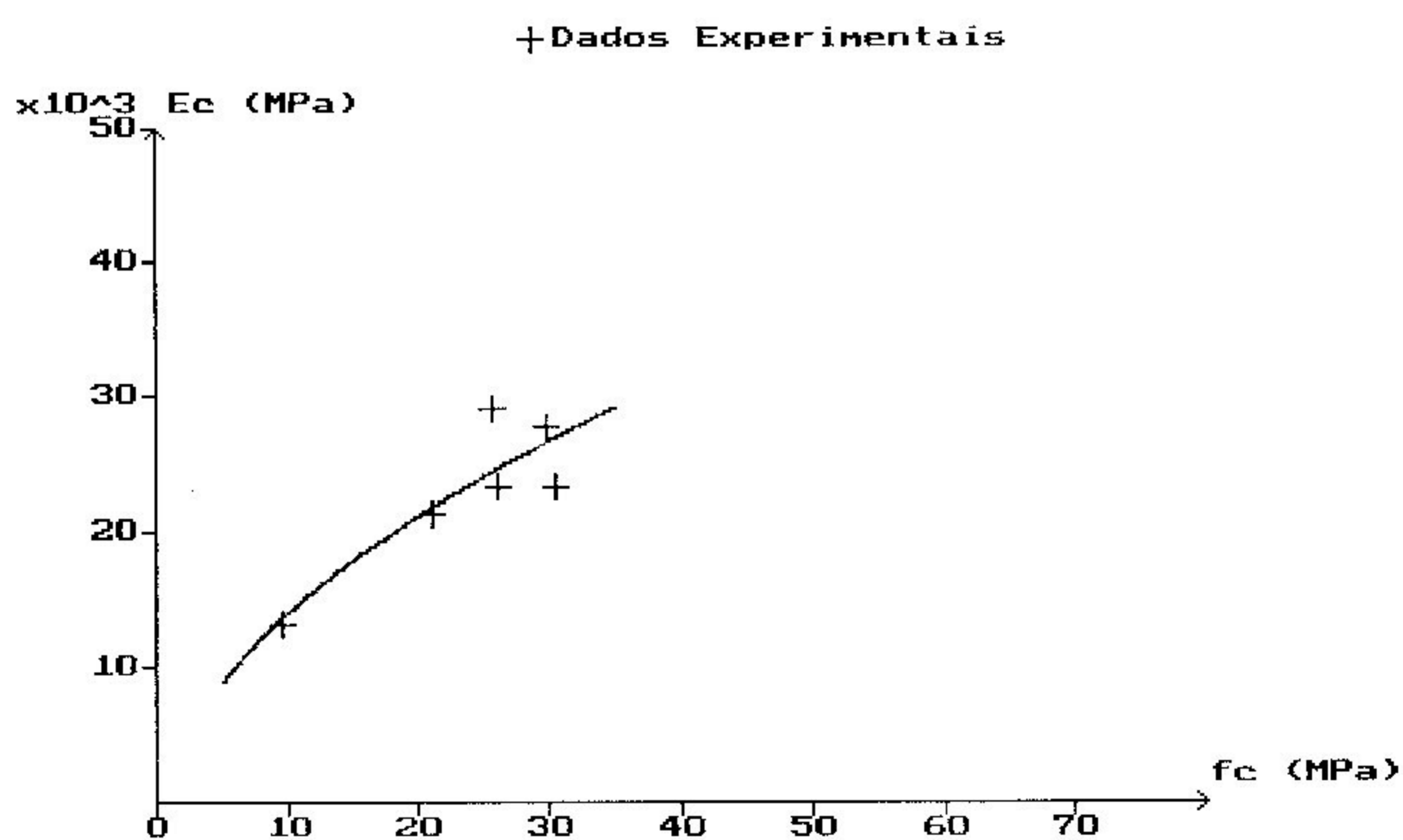


Figura 5.12 - Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à
compressão - Traço A (30 MPa)

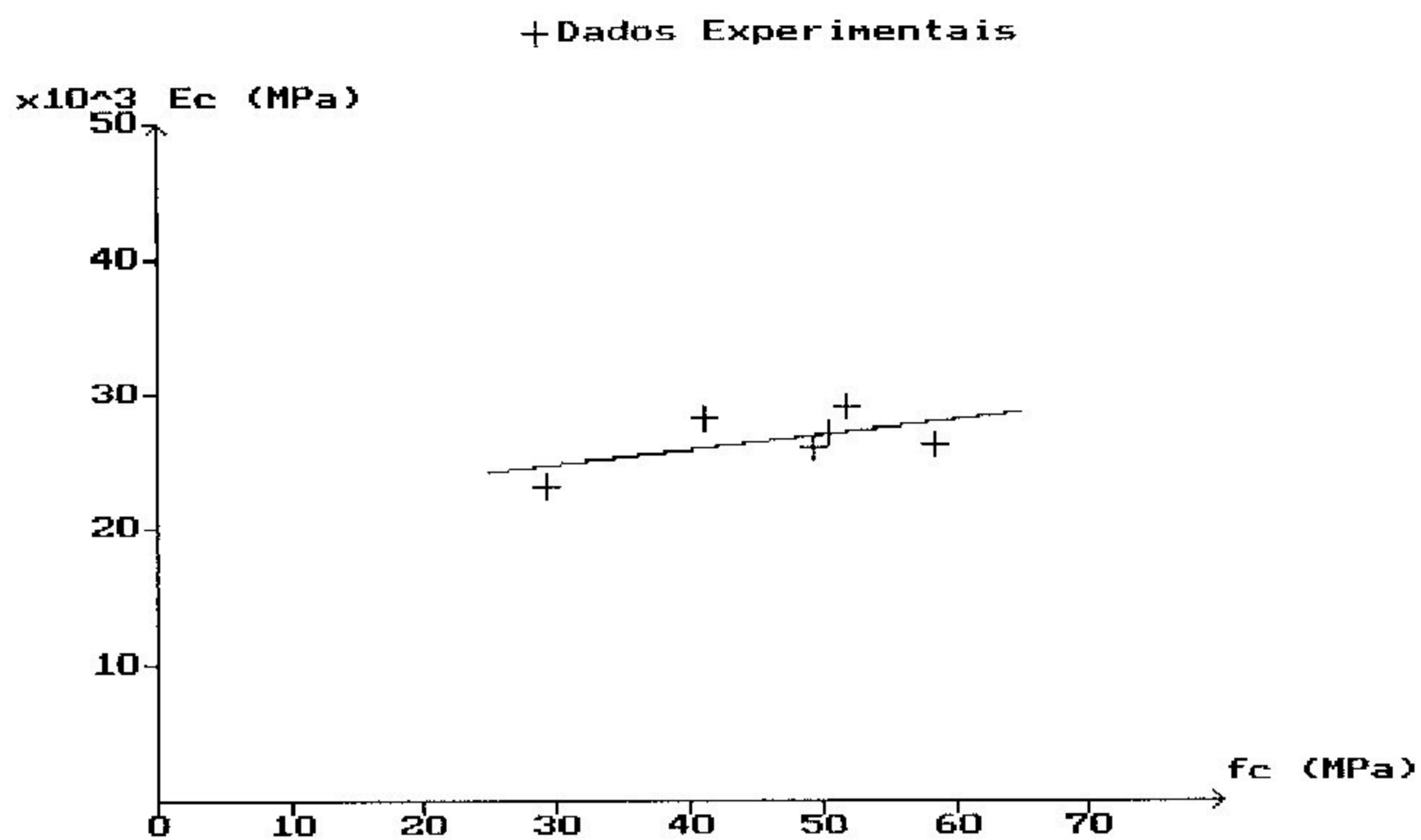


Figura 5.13 - Módulo de elasticidade x resistência à compressão
Traço B (50 MPa)

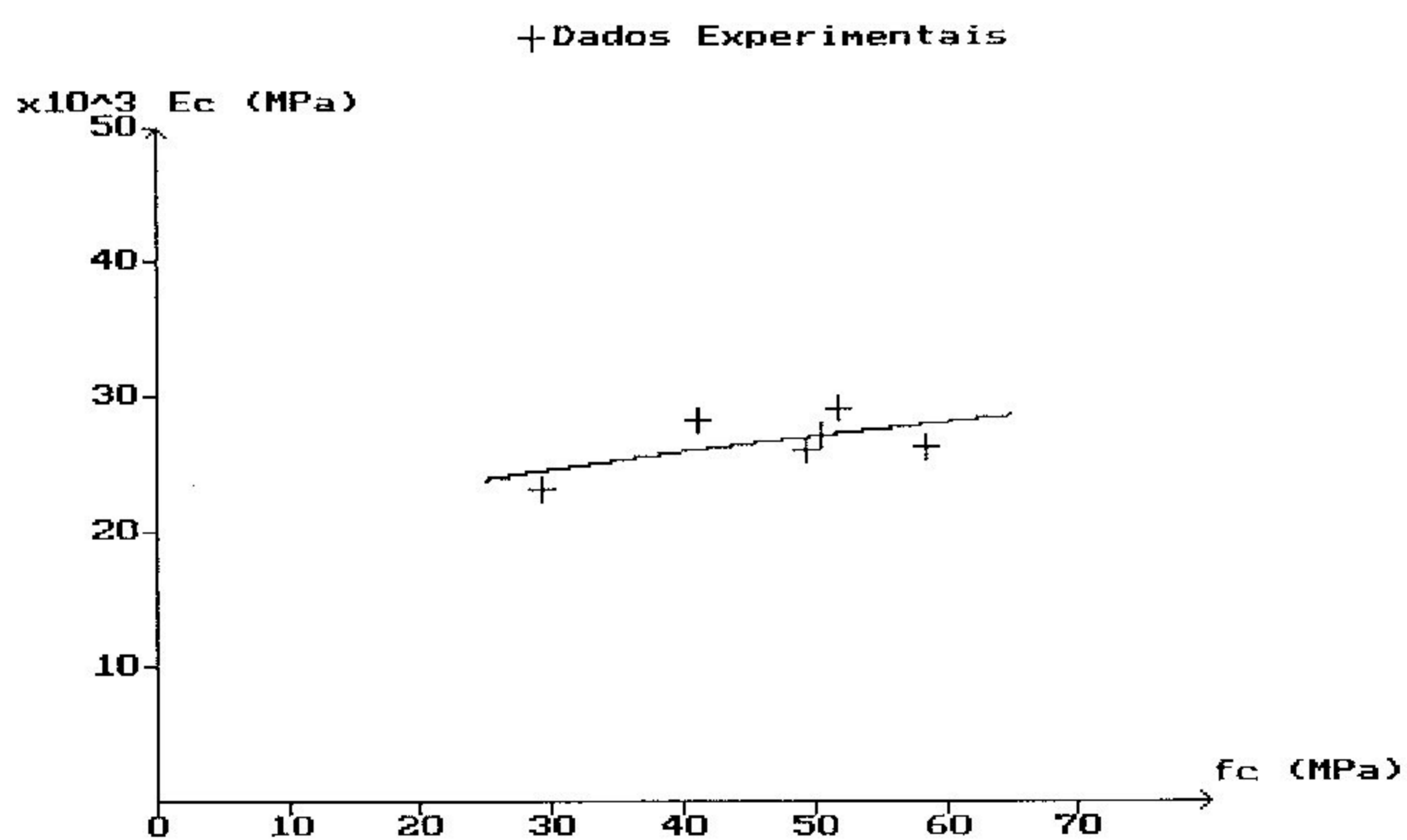


Figura 5.14 - Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à
compressão - Traço B (50 MPa)

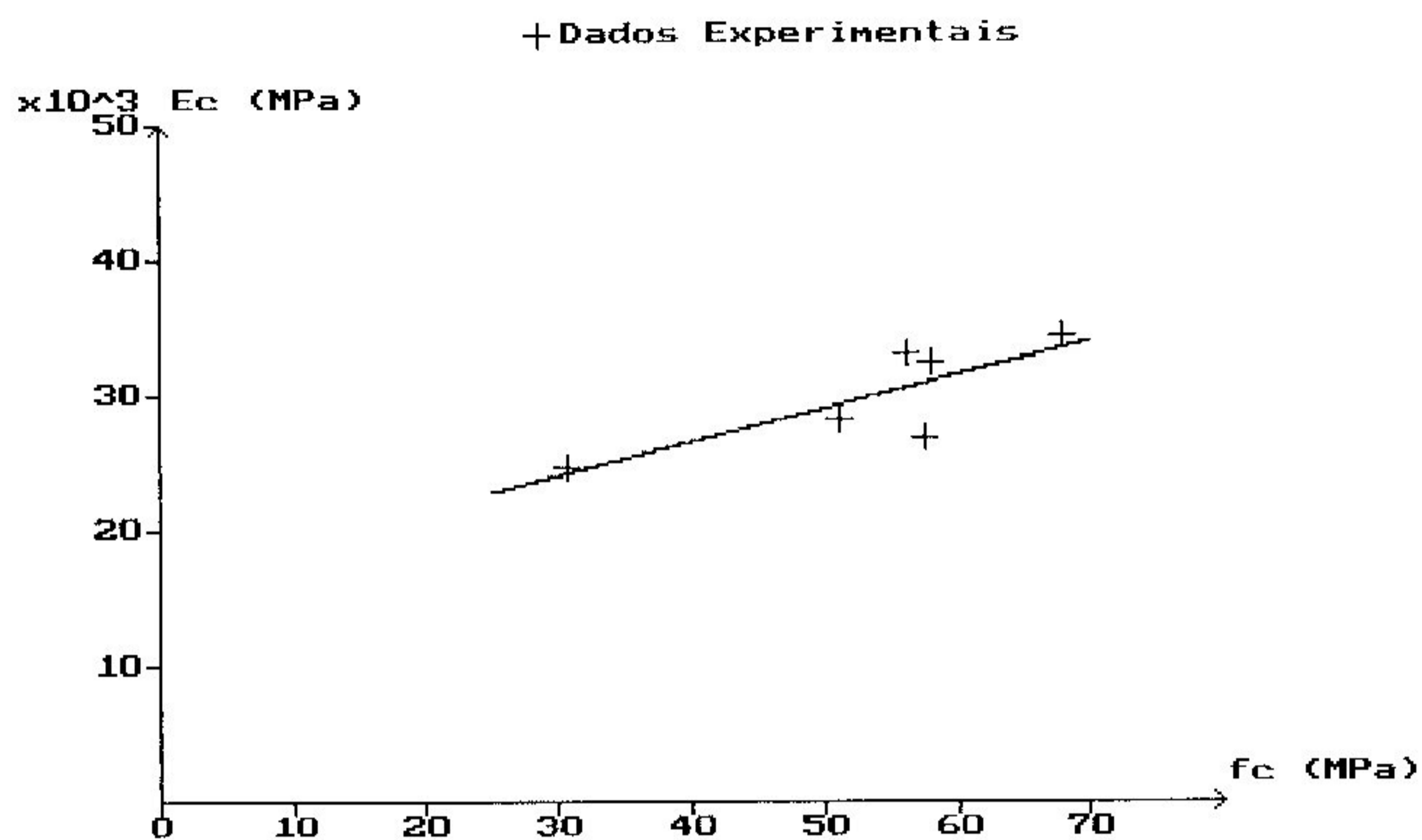


Figura 5.15 - Módulo de elasticidade x resistência à compressão
Traço C (55 MPa)

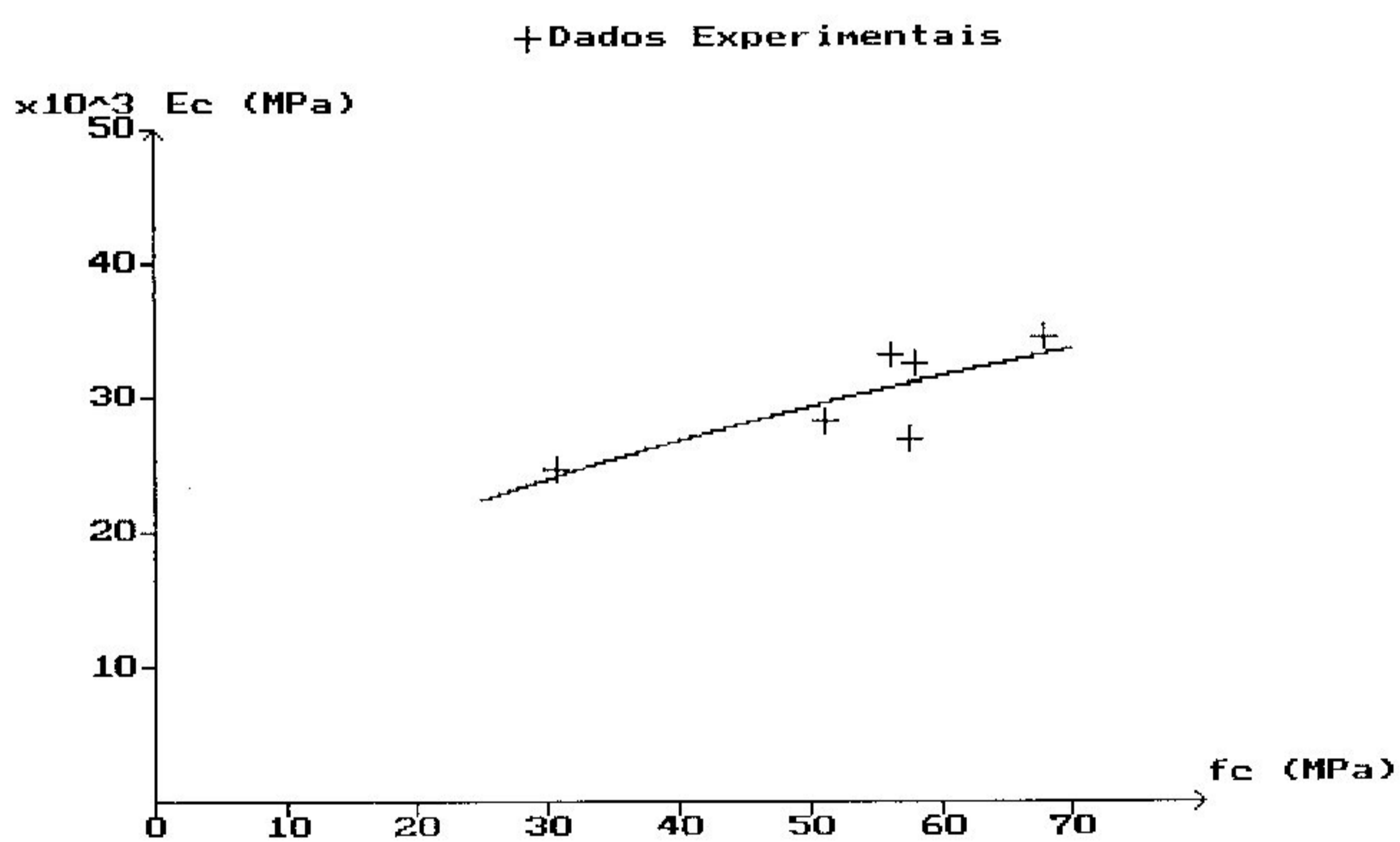


Figura 5.16 - Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à
compressão - Traço C (55 MPa)

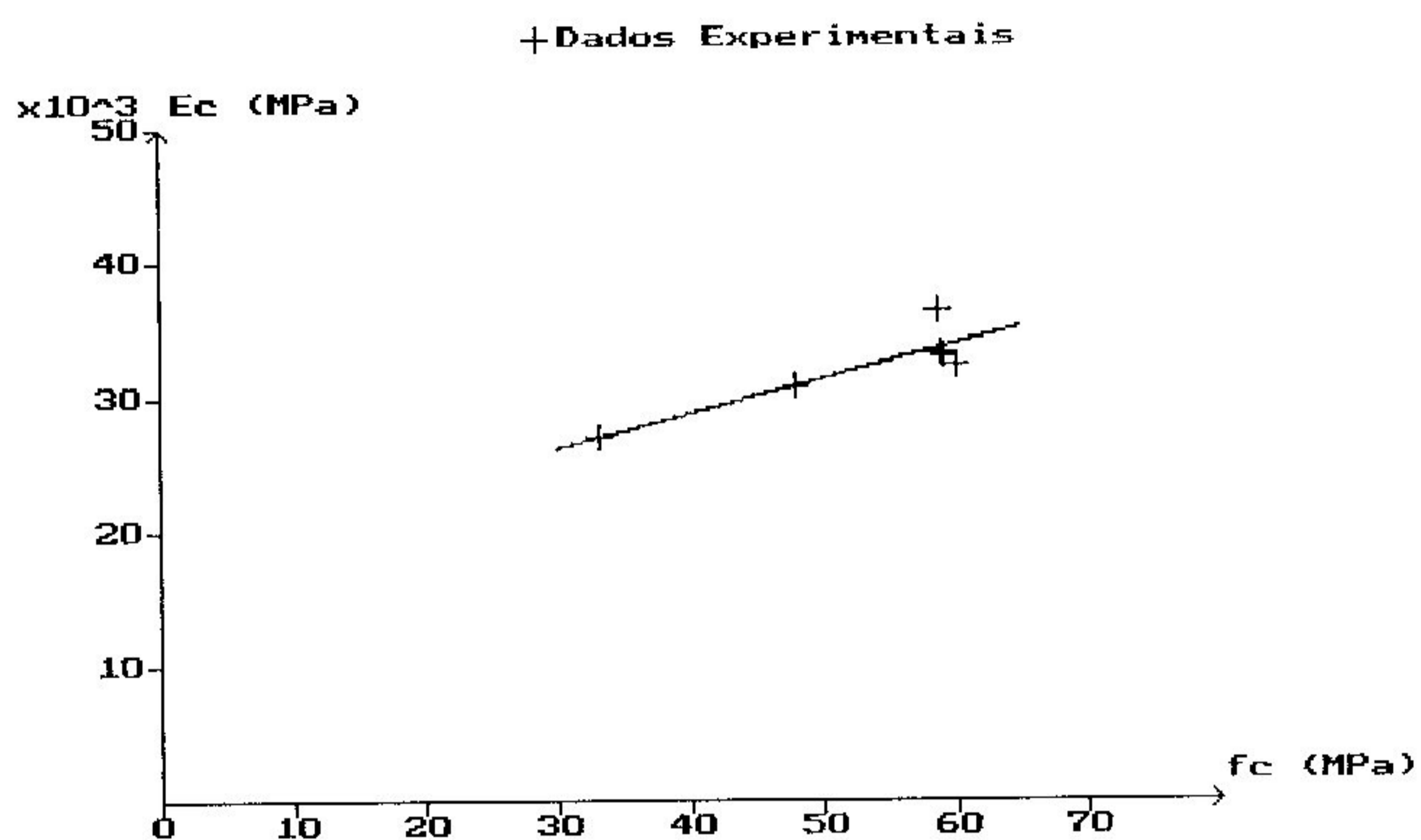


Figura 5.17 - Módulo de elasticidade x resistência à compressão
Traço D (60 MPa)

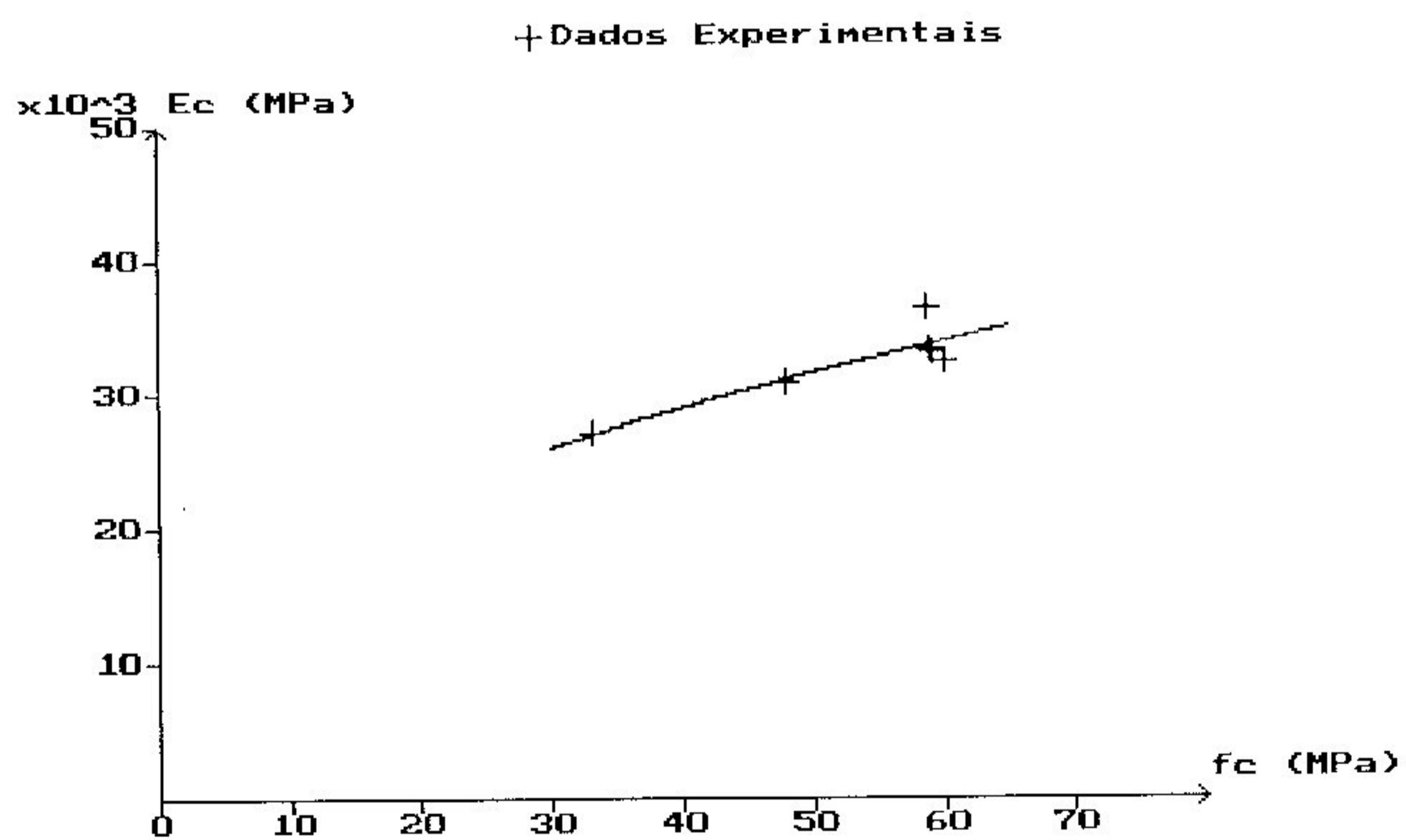


Figura 5.18 - Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à
compressão - Traço D (60 MPa)

A análise das Figuras 5.11 a 5.18 sugere que os dados apresentados na Tabela 5.5 poderiam ser tratados como sendo pertencentes a uma única população. Em outras palavras, os dados poderiam ser relacionados, independentemente do traço, através de uma equação apenas. Constata-se, também, pela simples observação da Tabela 5.6, que os valores do coeficiente de correlação das equações que expressam o módulo de elasticidade como uma função da raiz quadrada da resistência à compressão são iguais ou ligeiramente superiores aos coeficientes das relações que empregam a resistência à compressão como a variável independente. Assim sendo, dar-se-á prosseguimento a esta análise estatística apenas para o modelo de equação que relaciona as variáveis E_c e $\sqrt{f_c}$.

Para examinar se, de fato, todos os resultados poderiam ser tratados como uma única população, as equações obtidas para cada traço devem ser comparadas, estatisticamente, através de seus interceptos (A) e de seus coeficientes angulares (B). Qualquer diferença nos valores individuais desses parâmetros é testada comparando-se os seus respectivos intervalos de confiança determinados, individualmente, para cada traço. Se esses intervalos sobrepuserem total ou parcialmente, poder-se-ia dizer, então, que os interceptos e os coeficientes angulares não diferem, significativamente, uns dos outros e, conseqüentemente, poder-se-ia determinar uma única equação que relacionasse as variáveis E_c e $\sqrt{f_c}$ a partir de todos os dados.

Desta forma, os limites superior e inferior desses intervalos de confiança foram computados da maneira descrita nos itens B.5 e B.6 do Apêndice B, adotando-se um coeficiente de confiança igual a 0,95. Os valores desses limites estão apresentados na Tabela 5.7 e representados, graficamente, nas Figuras 5.19 e 5.20.

Tabela 5.7 - Limites superior e inferior dos interceptos e dos coeficientes angulares do modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$, para cada traço

Traço	Intercepto A		Coeficiente Angular B	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
A (30 MPa)	-24997	17861	1140	9939
B (50 MPa)	-3945	36269	-1401	4480
C (55 MPa)	-21023	32223	-287	6983
D (60 MPa)	-11846	25736	904	6067

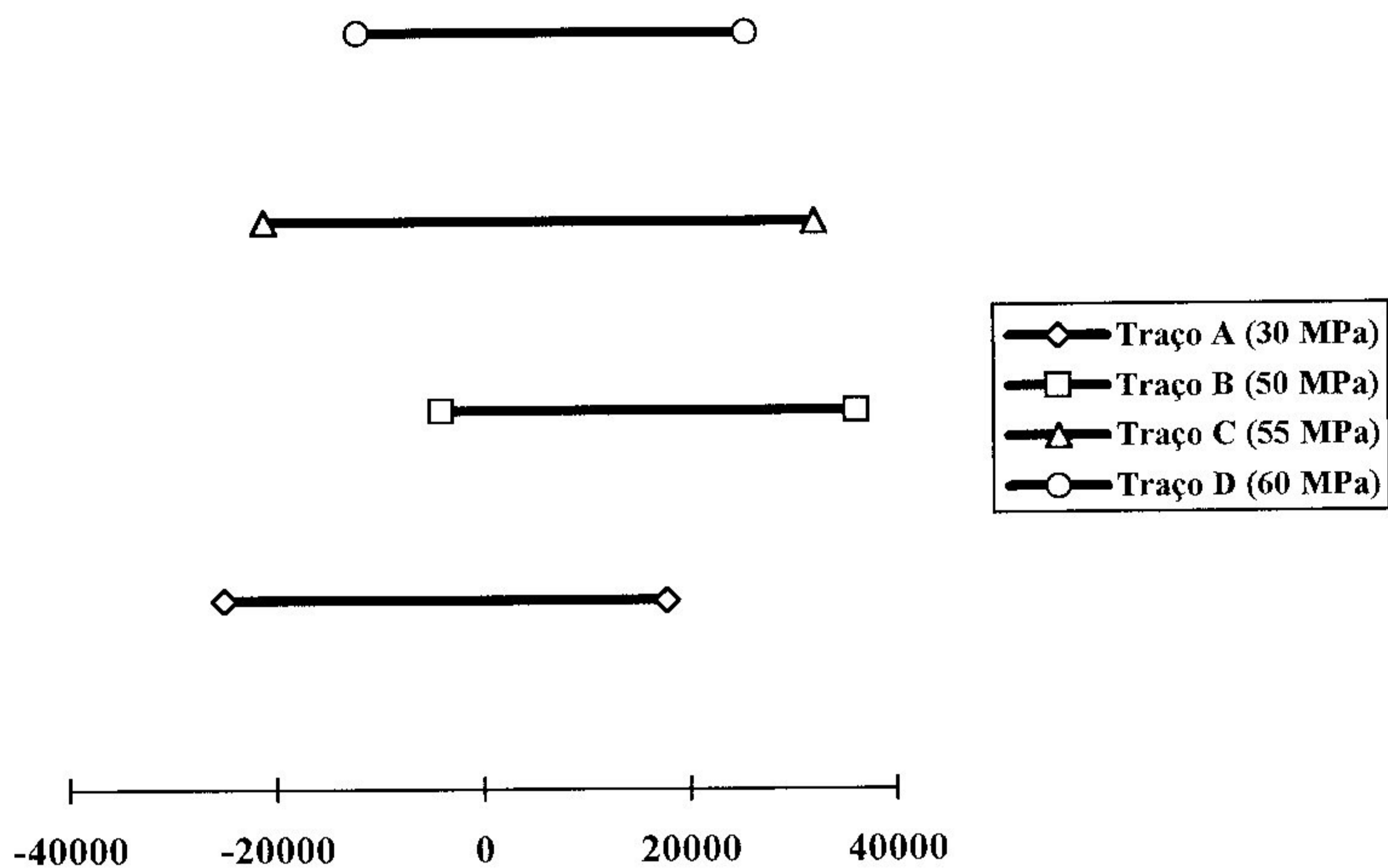


Figura 5.19 - Intervalos de confiança dos interceptos do modelo

$$E_c = A + B \sqrt{f_c}$$

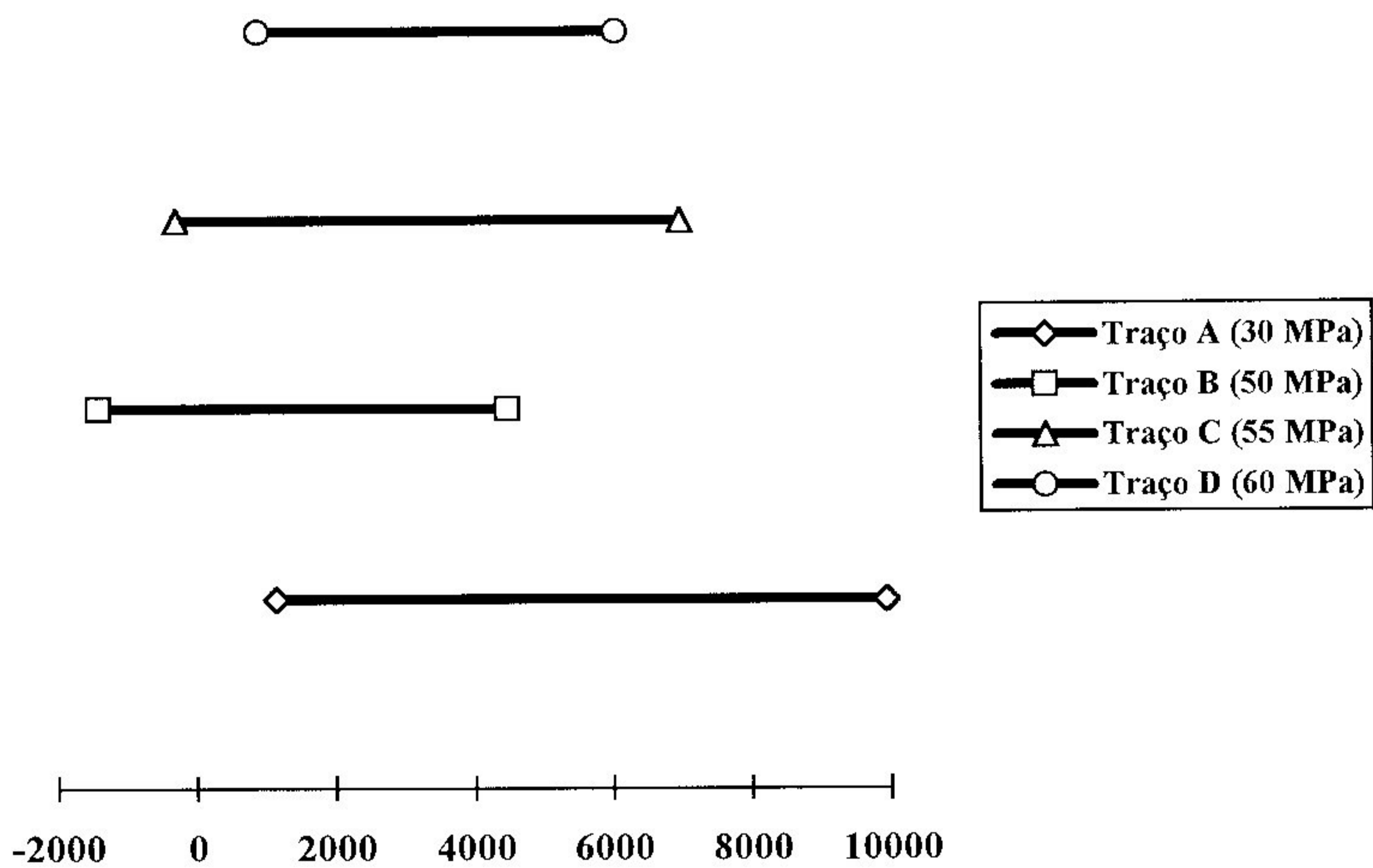


Figura 5.20 - Intervalos de confiança dos coeficientes angulares do modelo

$$E_c = A + B \sqrt{f_c}$$

Observando-se as Figuras 5.19 e 5.20, constata-se que os intervalos de confiança calculados, tanto para os interceptos como para os coeficientes angulares, sobrepõem, uns aos outros, parcialmente, dentro de uma limitada faixa. Baseando-se nestas observações, pode-se dizer, então, que todos os dados apresentados na Tabela 5.5 são pertencentes a uma única população. Conseqüentemente, o módulo de elasticidade de concretos de diferentes traços e diferentes idades pode ser expresso em termos da raiz quadrada da resistência à compressão através de uma única equação.

Uma vez adotada esta hipótese, os parâmetros estatísticos do modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$ foram computados para toda a população de dados, semelhantemente à maneira pela qual esses parâmetros foram determinados para cada traço, individualmente. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.8, a seguir. A curva assim obtida pode ser visualizada na Figura 5.21.

Tabela 5.8 - Parâmetros estatísticos associados ao modelo $E_c = A + B \sqrt{f_c}$, quando aplicado a todos os dados

Parâmetro A			Parâmetro B			Coef. Correl. R	Desvio Padrão s
A	Limite Inferior	Limite Superior	B	Limite Inferior	Limite Superior		
6654	384	12925	3261	2319	4204	0,84	2850

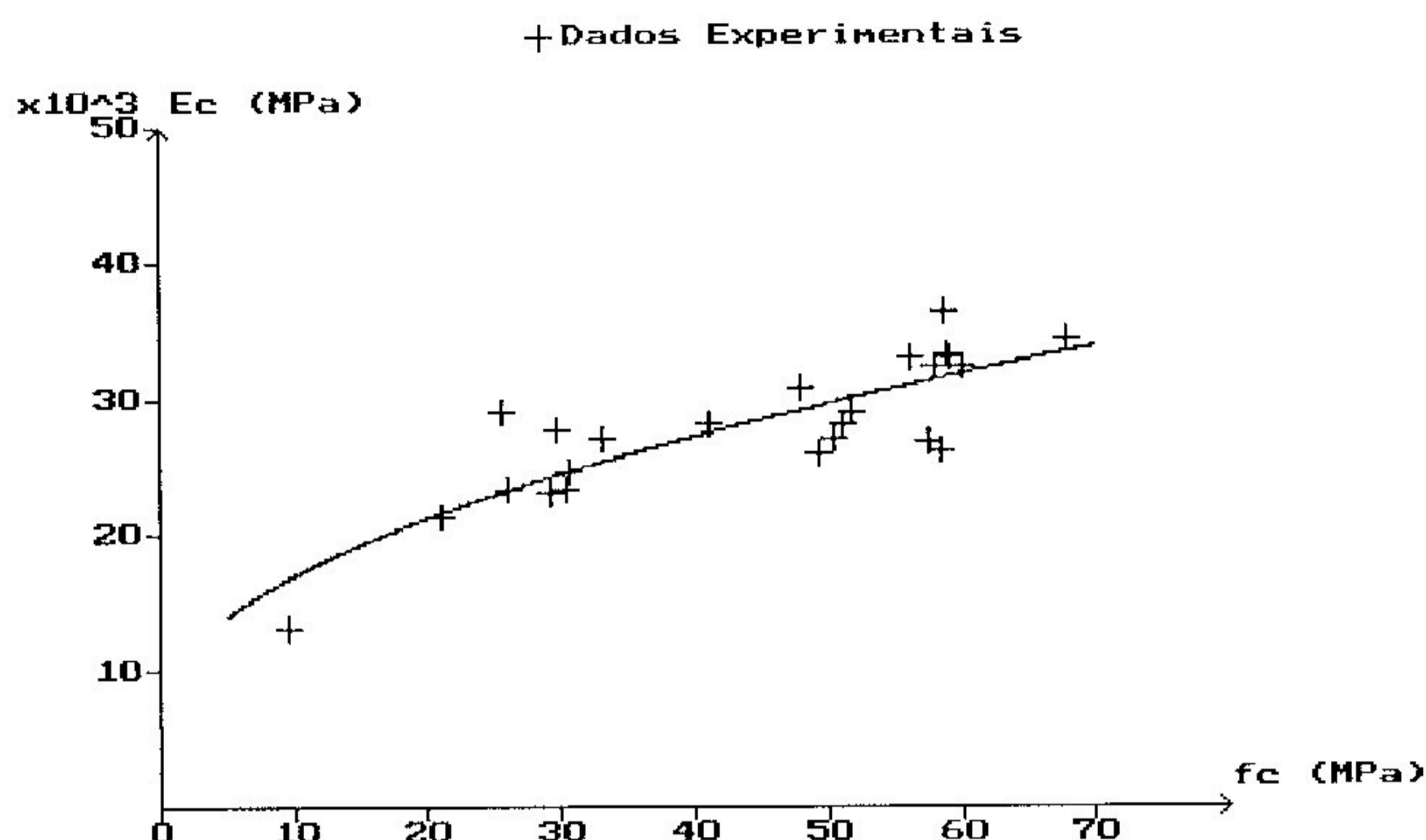


Figura 5.21 - Módulo de elasticidade x raiz quadrada da resistência à compressão - (Todos os traços)

Portanto, baseando nesta análise, adotar-se-á a seguinte expressão matemática que relaciona o módulo de elasticidade e a raiz quadrada da resistência à compressão:

$$E_c = 6654 + 3261 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (5.1)$$

$$(10 \text{ MPa} < f_c < 70 \text{ MPa})$$

É importante ressaltar que, uma vez que essa expressão foi determinada para os resultados obtidos neste trabalho, sua validade está limitada aos valores mínimo e máximo da resistência à compressão aqui determinados. Em outras palavras, a equação (5.1) é válida apenas para valores de resistência à compressão compreendidos entre 10 MPa e 70 MPa.

Toda expressão de correlação entre variáveis deve ser testada quanto a sua capacidade de ajustar a dados diferentes daqueles a partir dos quais ela foi deduzida. Desta forma, a equação (5.1) será aplicada aos resultados experimentais obtidos por alguns pesquisadores [20] [10] [27] [31], cujos trabalhos foram citados no Capítulo 2. Apesar dos resultados do módulo de

elasticidade destes trabalhos terem sido determinados pelo método da corda, especificado pela norma americana ASTM C 469-81, utilizar-se-á, nesta comparação, a equação (5.1), deduzida a partir dos resultados segundo a norma brasileira NBR 8522, uma vez que, pela Tabela 5.1, praticamente nenhuma diferença foi constatada entre os resultados aqui obtidos segundo essas duas normas.

Para cada conjunto de dados foram calculadas as relações entre o valor calculado, empregando-se a equação (5.1), e o valor observado pelo autor. Com o objetivo de se avaliar a excelência do grau de ajustamento da equação (5.1) aos dados disponíveis, as expressões recomendadas pelas normas NBR 6118/80, ACI 318/89, ACI 363/92 e CEB-FIP MC/90 foram, semelhantemente, aplicadas a cada conjunto de dados, respeitando-se, porém, os limites de resistência à compressão dentro dos quais essas expressões são válidas. Para esta análise, empregou-se apenas as expressões citadas nas normas, uma vez que são as relações mais comumente utilizadas pelos profissionais ligados à área de projetos de estruturas. Os resultados desta análise encontram-se apresentados nas Tabelas C.1 a C.6, do Apêndice C do presente trabalho. Cada uma dessas tabelas corresponde a cada conjunto de resultados obtidos por cada um dos pesquisadores acima citados. A Figura 5.22 ilustra, graficamente, os resultados apresentados nessas tabelas.

Na Tabela 5.9 encontram-se apresentados, para cada conjunto de dados encontrado na literatura pesquisada, os valores médios da relação entre o valor calculado e aquele obtido em ensaios, bem como os coeficientes de variação dos resultados obtidos. Esse coeficiente de variação quantifica, em termos de porcentagem, o grau de dispersão dos dados em relação a uma determinada equação de curva. Ele é definido pela seguinte expressão:

$$C.V. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{cal}_i - \text{obs}_i}{\text{obs}_i} \right)^2}{n}} \times 100 \quad (\text{em } \%) \quad (5.2)$$

onde C.V. é o coeficiente de variação, expresso em %;
cal é o valor calculado empregando-se uma determinada equação;
obs é o valor observado nos ensaios; e
n é o número de dados.

Faz-se necessário referenciar aqui o programa *ANDA - Sistema para Análise de Dados* [46]. Esse programa foi utilizado na análise comparativa dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados previstos pelas equações da norma brasileira, americana e europeia. Tanto a média da relação entre o valor calculado e o valor real, obtido no ensaio, quanto os coeficientes de variação foram extraídos desse programa.

Tabela 5.9 - Tabela geral dos resultados obtidos na análise comparativa entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e os valores previstos por algumas equações

Autor	Faixa de f_c (MPa)	Presente Estudo		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92		CEB-FIP MC / 90	
		Média cal/obs	Coef. Var. (%)	Média cal/obs	Coef. Var. (%)	Média cal/obs	Coef. Var. (%)	Média cal/obs	Coef. Var. (%)	Média cal/obs	Coef. Var. (%)
Lew e Reichard	9 a 25	0,857	16,491	1,042	7,118	0,830	17,605	0,833	17,713	0,932	9,479
Nilson e Slate	26 a 94	0,977	10,785	1,391	43,135	1,108	18,070	0,996	10,15	1,080	12,662
Carrasquillo	32 a 77	1,190	23,005	1,646	68,032	1,310	35,429	1,190	24,159	1,292	33,549
Shih <i>et al/i</i>	24 a 84	0,965	16,586	1,336	38,797	1,064	16,667	0,965	16,017	1,044	18,532
Oluokun	1 a 61	0,876	14,969	1,181	31,616	0,941	21,469	0,853	15,092	0,950	7,239
Flor	10 a 68	1,012	10,825	1,391	41,925	1,108	16,163	1,023	9,868	1,119	15,718
Todos	1 a 94	0,974	16,044	1,343	41,329	1,069	19,651	0,984	16,011	1,069	19,073

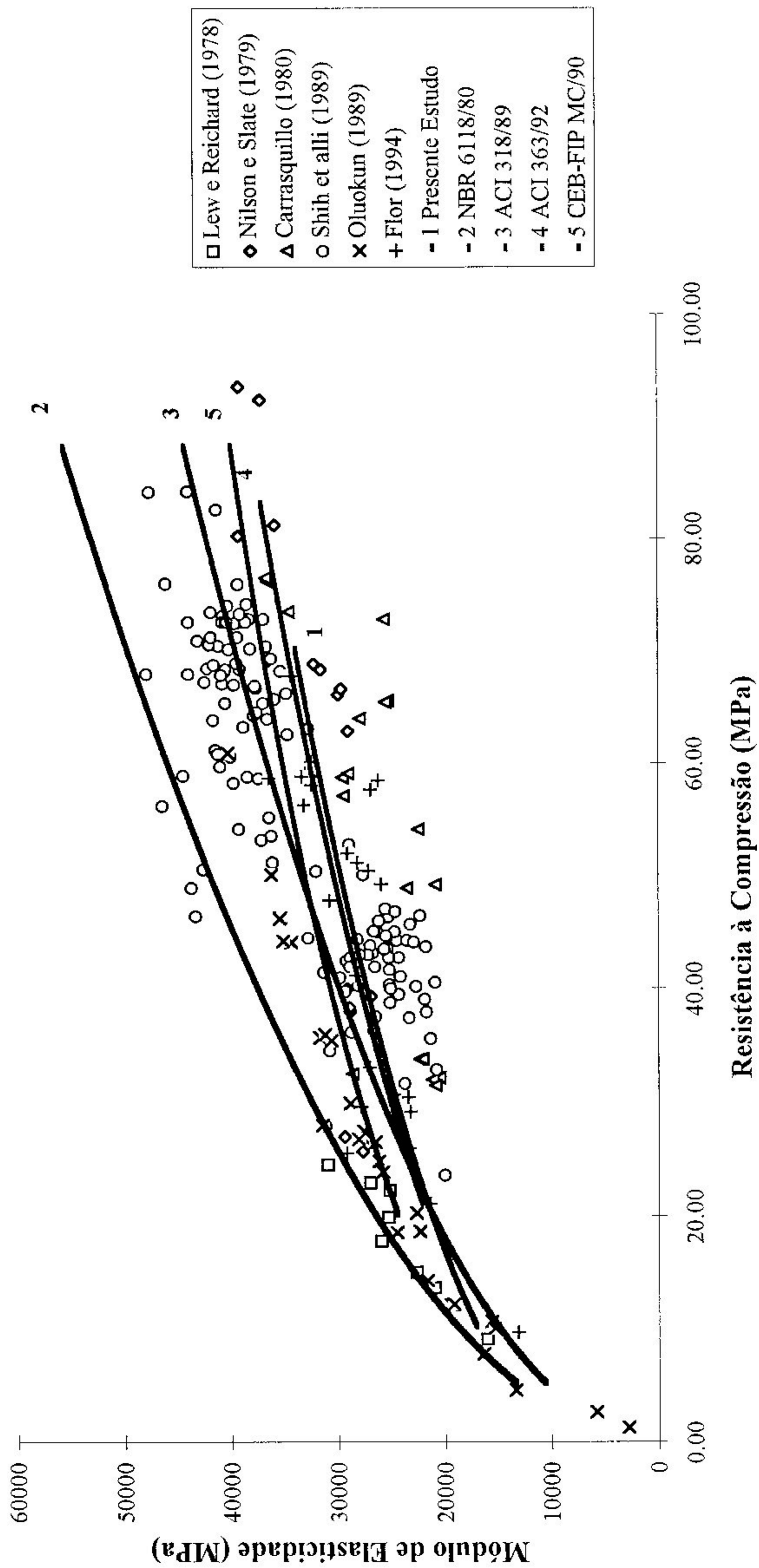


Figura 5.22 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e os valores previstos por algumas equações

A análise da Tabela 5.9, paralelamente à observação da Figura 5.22, revela que, de uma maneira global, uma boa correlação foi alcançada ao se aplicar a equação (5.1), do presente estudo, aos resultados experimentais coletados. As maiores discrepâncias obtidas para essa equação foram para o conjunto de dados apresentados por Carrasquillo [10] e para os resultados de ensaios realizados por Lew e Reichard [20]. A equação (5.1) superestima os valores do módulo de elasticidade obtidos por Carrasquillo em 19%, em média, enquanto que essa mesma equação subestima em 14%, em média, os valores obtidos por Lew e Reichard. Coincidentemente, todas as demais equações de normas, empregadas neste estudo comparativo, apresentaram as maiores médias para o conjunto de resultados obtidos experimentalmente por Carrasquillo. A norma brasileira, NBR 6118/80 superestima em quase 65%, em média, os seus valores do módulo de elasticidade. Semelhantemente, os maiores coeficientes de variação foram obtidos para esse conjunto de dados. Entretanto, constata-se que, apesar da equação (5.1) apresentar a mesma média obtida pela equação recomendada pelo ACI 363/92, aquela equação ainda obteve o menor grau de dispersão para esse conjunto de resultados: 23%. Quanto aos dados apresentados por Lew e Reichard, a norma brasileira apresentou a melhor correlação, superestimando em 4%, em média, os valores do módulo de elasticidade por eles encontrados, enquanto a equação do ACI 318/89 subestima esses mesmos valores em 17%. Aprofundando-se um pouco nesta análise, observa-se que os valores de resistência à compressão, apresentados por Lew e Reichard, são os únicos que apresentaram-se, totalmente, dentro da faixa de resistência de concretos comumente empregados em nossas estruturas, ou seja, resistências à compressão inferiores a 30 MPa.

Outro conjunto de resultados que também não apresentou boa correlação com os valores previstos pelas diferentes equações aqui estudadas foi o apresentado por Oluokun [31]. As equações do ACI 363/92, (5.1) do presente estudo, do ACI 318/89 e do CEB-FIP MC/90 subestimaram os valores do módulo apresentados pelo autor em, 15%, 12%, 6% e 5%, respectivamente. Por outro lado, a equação da norma brasileira foi a única que apresentou uma média maior que 1 (um), ou seja, essa equação superestima os valores do módulo obtidos por Oluokun em 18%.

É importante ressaltar aqui que esta análise comparativa foi realizada independentemente do traço empregado na fabricação dos concretos investigados

por cada pesquisador. Em outras palavras, o estudo comparativo aqui apresentado foi realizado independentemente do tipo de cimento e dos agregados utilizados na fabricação dos concretos, bem como do emprego ou não de aditivos e/ou adições minerais pozolânicas, como a microssílica e a cinza volante. Adicionalmente, não se considerou nem as diferentes idades da realização dos experimentos, nem as dimensões dos corpos-de-prova. Essa ressalva faz-se necessária tendo em vista a grande diversificação dos materiais empregados e das diferentes idades investigadas por cada autor, como pode ser constatado nas notas apresentadas em cada tabela do Apêndice C.

Portanto, ao se analisar todos os dados simultaneamente, observa-se que as equações (5.1) e a recomendada pelo ACI 363/92 apresentaram um excelente grau de ajustamento aos dados coletados. Ambas apresentaram-se conservadoras ao estimarem os valores do módulo de elasticidade: esta subestima os resultados catalogados em 2% enquanto aquela os subestima em 3%. Entretanto, o mesmo grau de dispersão dos resultados foi apresentado por ambas as equações: 16%. As demais equações superestimaram o valor do módulo de elasticidade. A equação da NBR 6118/80 superestimou, em média, os resultados em 34%. Os valores do módulo de elasticidade previstos pelas expressões do ACI 318/89 e do CEB-FIP MC/90 apresentaram-se 7% superiores aos valores obtidos em ensaios.

5.3.3 Correlação entre a Resistência à Tração e a Resistência à Compressão

Analogamente ao estudo da correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, descrito no item 5.3.2, realizou-se também uma avaliação da correlação existente entre a resistência à tração, determinada pelo ensaio da compressão diametral, e a resistência à compressão uniaxial. Os dados para esta investigação foram apresentados, anteriormente, no Capítulo 4 e encontram-se reproduzidos na Tabela 5.10, a seguir.

Tabela 5.10 - Tabela geral dos resultados da resistência à compressão e da resistência à tração

Traço (f_c esperado)	Idade (dias)	f_c (MPa)	f_t (MPa)
A (30 MPa)	1	9,7	1,40
	3	21,1	2,60
	7	25,5	2,80
	14	26,0	2,70
	28	30,5	2,70
	56	29,6	3,35
B (50 MPa)	1	29,2	3,10
	3	41,2	3,65
	7	52,0	4,15
	14	50,5	3,75
	28	49,3	3,90
	56	58,5	4,30
C (55 MPa)	1	30,7	3,55
	3	51,2	4,65
	7	57,7	4,90
	14	56,3	4,40
	28	58,1	4,55
	56	67,9	4,70
D (60 MPa)	1	33,1	3,70
	3	47,9	4,80
	7	60,2	5,00
	14	59,2	4,40
	28	58,9	4,45
	56	58,7	4,70

Semelhantemente, para cada traço, procurou-se investigar uma possível relação linear entre a resistência à tração e a resistência à compressão. Procurou-se relacionar, também, a resistência à tração com a raiz quadrada da resistência à compressão. A vantagem de se investigar essas relações reside na simplicidade de sua utilização e no fato desses modelos de expressões serem comumente propostos nas normas de projeto. Portanto, procurou-se determinar relações do tipo $f_t = A + B f_c$ e $f_t = A + B \sqrt{f_c}$.

Os valores dos parâmetros A e B dos modelos matemáticos propostos foram determinados para cada traço. Adicionalmente, os coeficientes de correlação R e os desvios padrão s da estimativa de f_t para f_c (ou $\sqrt{f_c}$) também foram calculados. Os resultados desta análise estatística estão apresentados na Tabela 5.11, e podem ser visualizados, graficamente, nas Figuras 5.23 a 5.30.

Tabela 5.11 - Parâmetros estatísticos associados aos modelos que relacionam a resistência à tração e a resistência à compressão, para cada traço

Traço	$f_t = A + B f_c$				$f_t = A + B \sqrt{f_c}$			
	A	B	R	s	A	B	R	s
A (30 MPa)	0,77	0,08	0,92	0,29	-0,62	0,67	0,93	0,27
B (50 MPa)	1,95	0,04	0,96	0,13	0,31	0,51	0,96	0,13
C (55 MPa)	2,68	0,03	0,87	0,26	1,11	0,46	0,89	0,24
D (60 MPa)	2,84	0,03	0,74	0,34	1,36	0,43	0,76	0,33

OBS: Nesta tabela, a notação empregada é:

A - intercepto da reta;

B - coeficiente angular da reta;

R - coeficiente de correlação; e

s - desvio padrão da estimativa de f_t para f_c (ou $\sqrt{f_c}$).

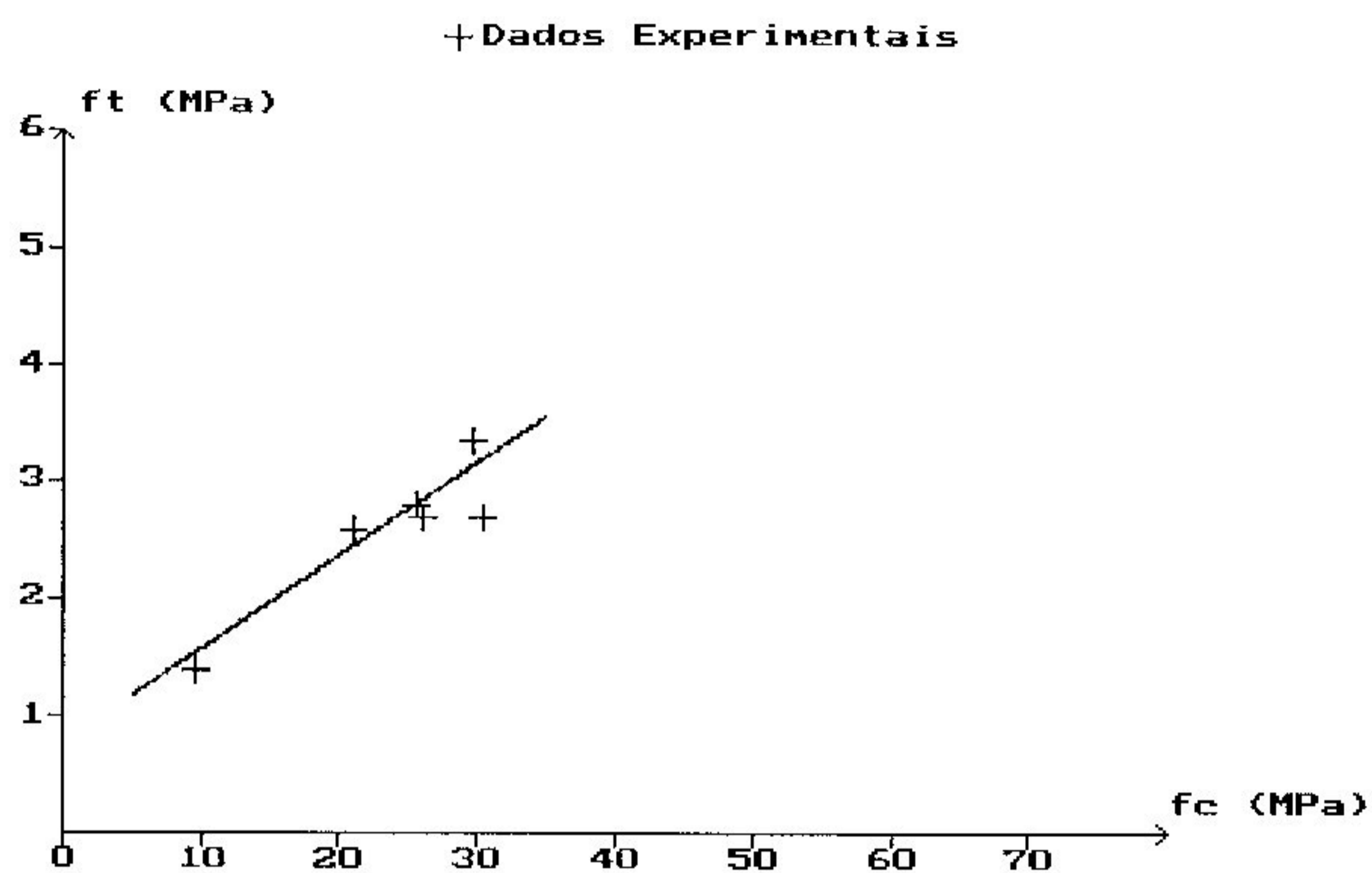


Figura 5.23 - Resistência à tração x resistência à compressão
Traço A (30 MPa)

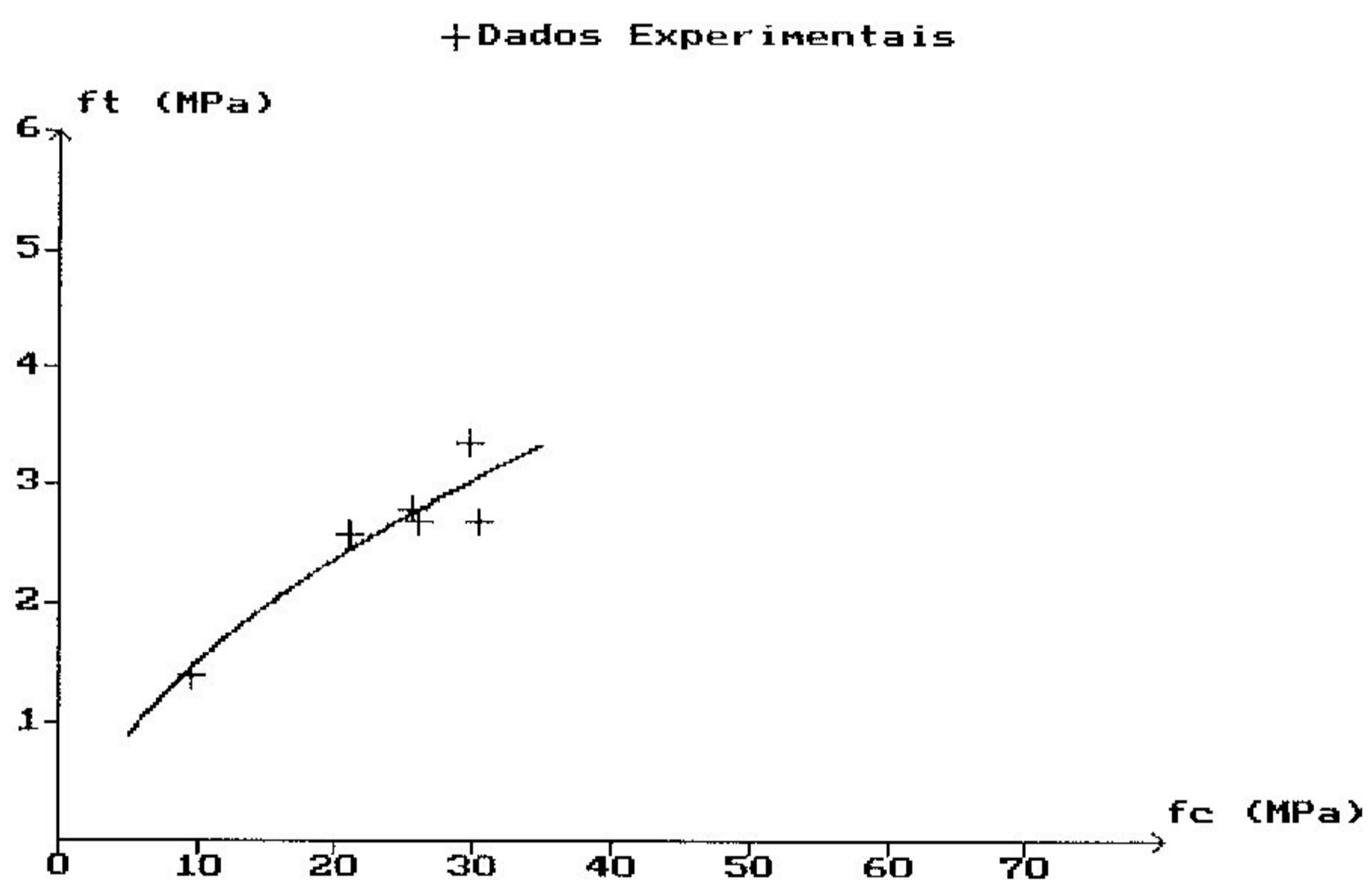


Figura 5.24 - Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão
Traço A (30 MPa)

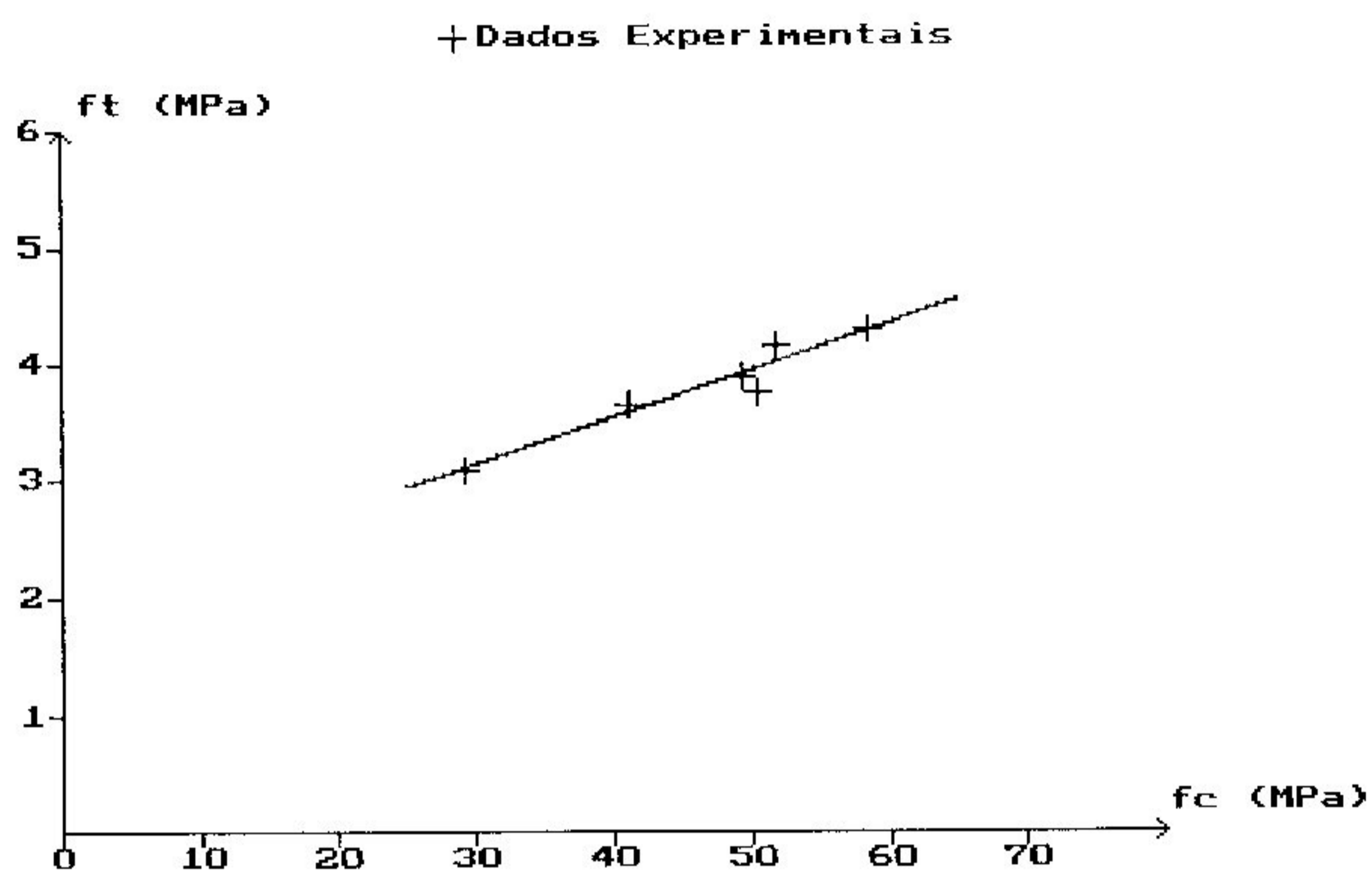


Figura 5.25 - Resistência à tração x resistência à compressão
Traço B (50 MPa)

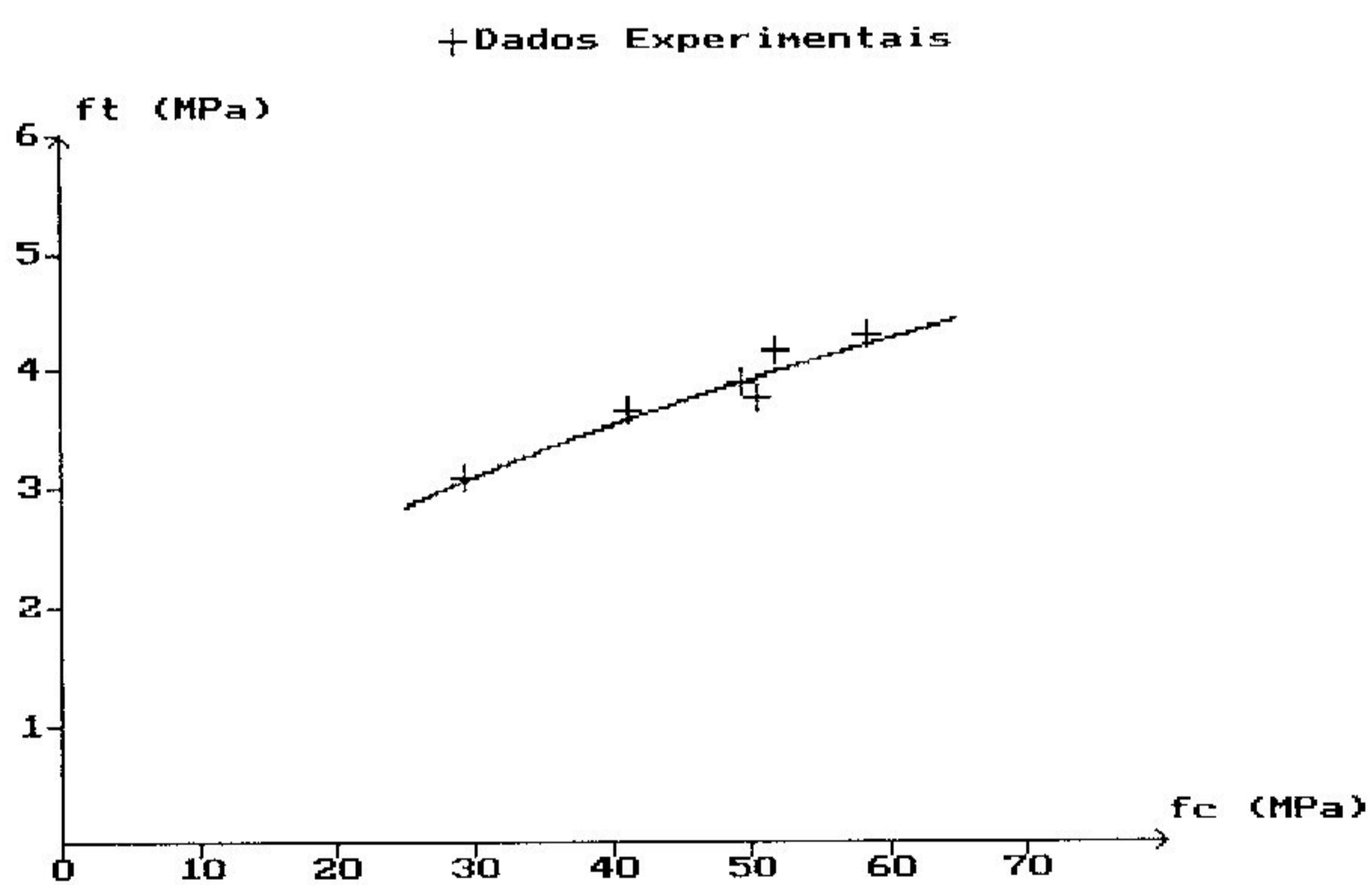


Figura 5.26 - Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão
Traço B (50 MPa)

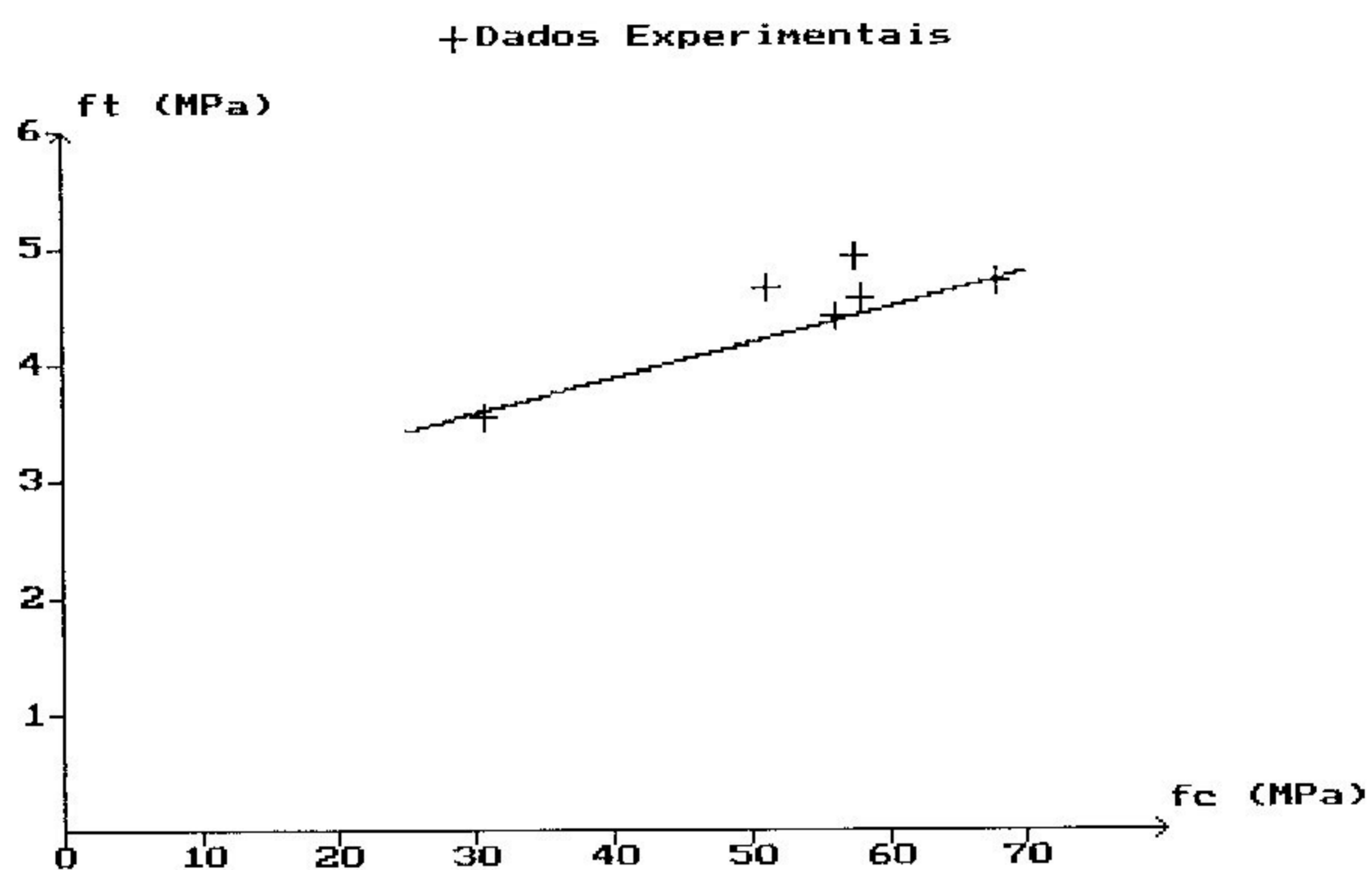


Figura 5.27 - Resistência à tração x resistência à compressão
Traço C (55 MPa)

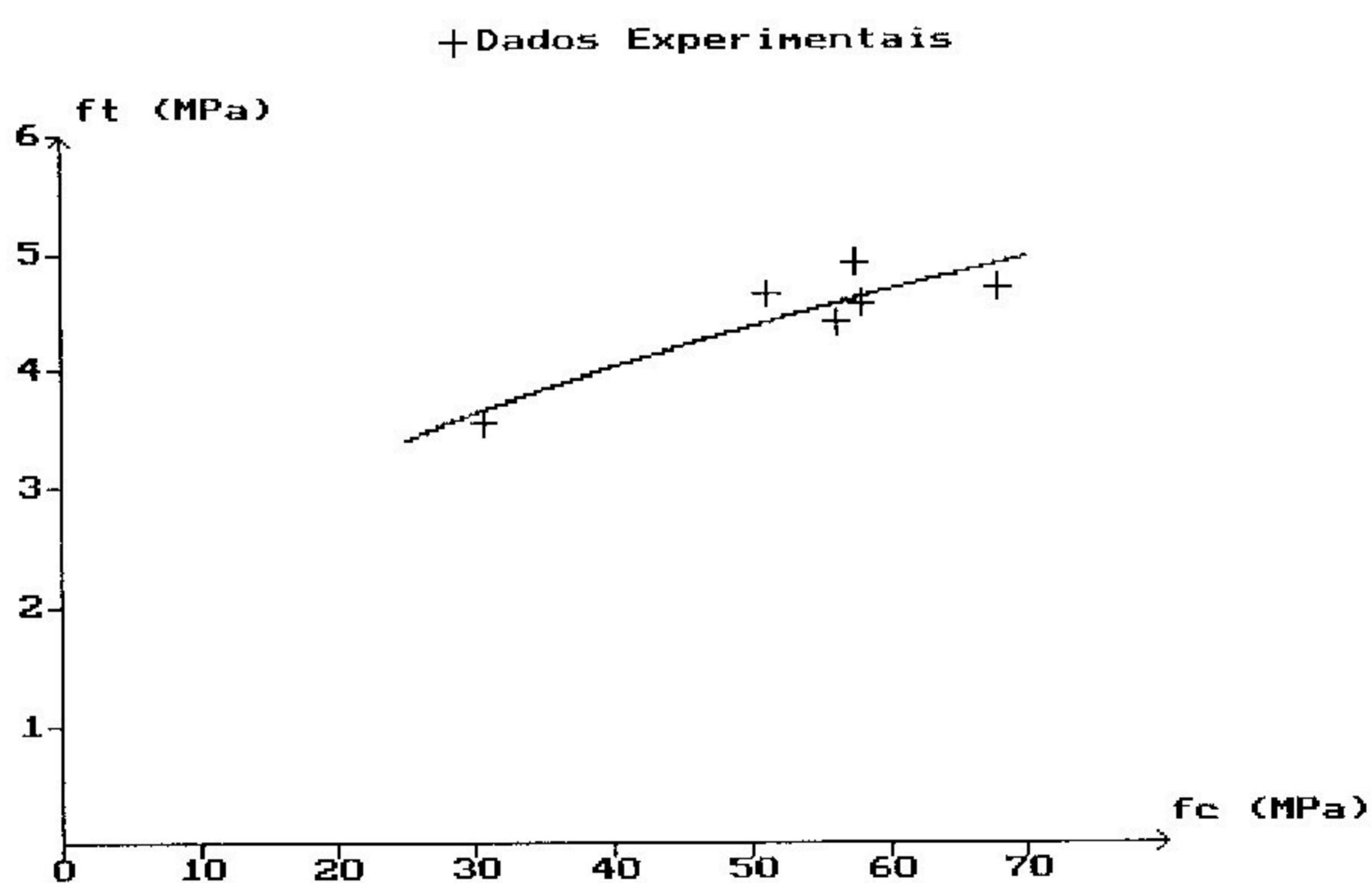


Figura 5.28 - Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão
Traço C (55 MPa)

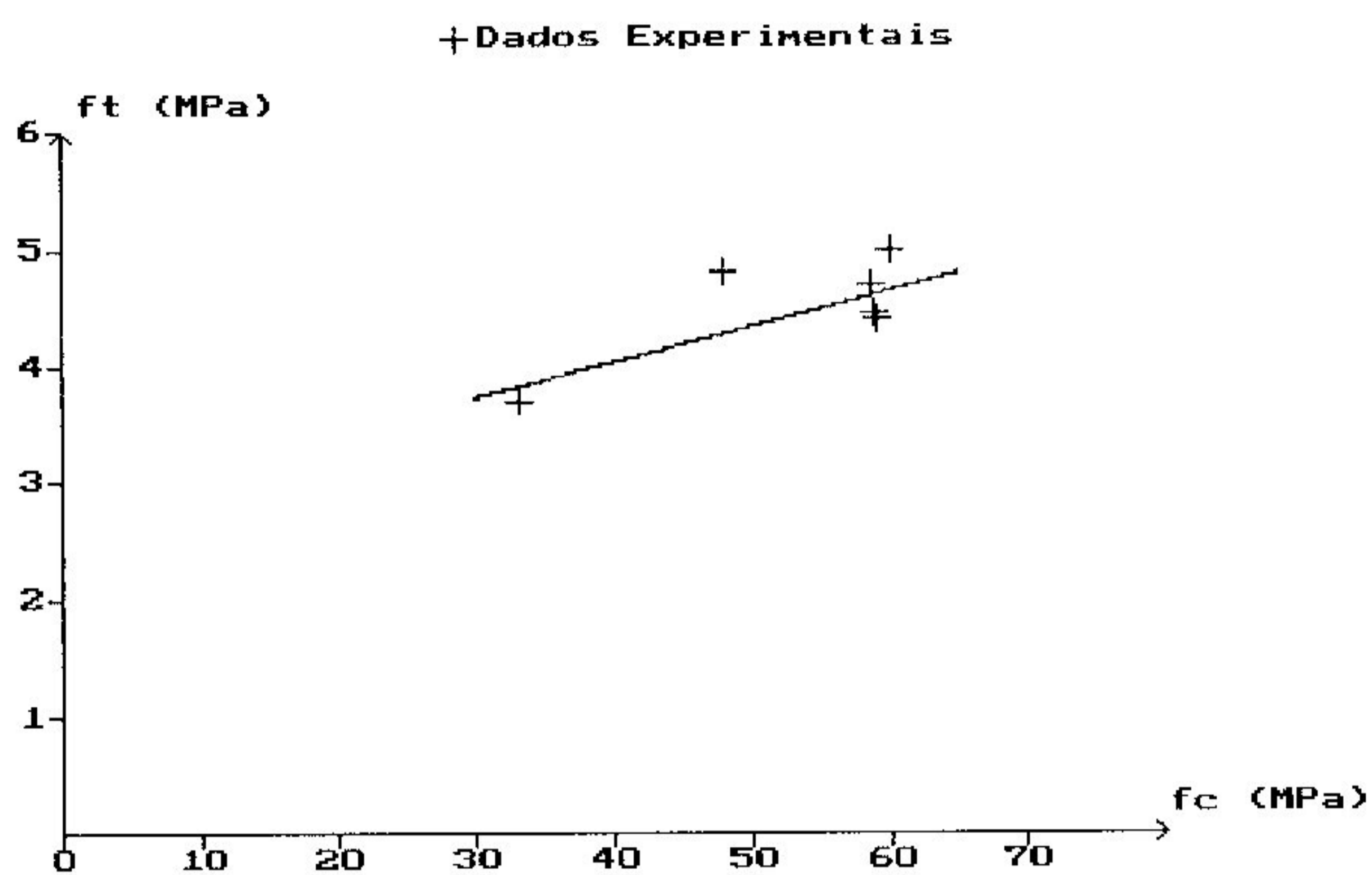


Figura 5.29 - Resistência à tração x resistência à compressão
Traço D (60 MPa)

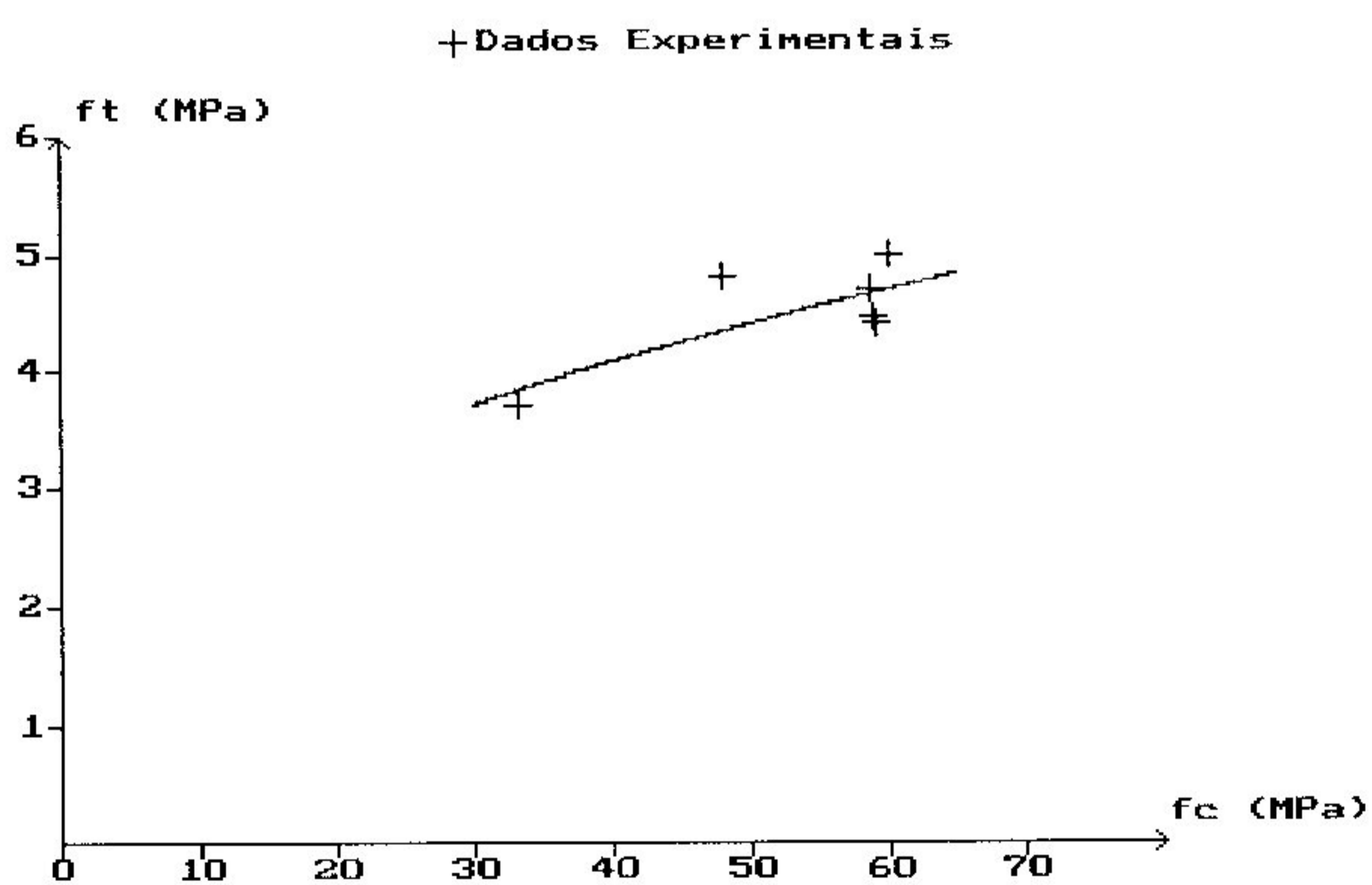


Figura 5.30 - Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão
Traço D (60 MPa)

A análise das Figuras 5.23 a 5.30 sugere que os dados apresentados na Tabela 5.10 poderiam ser relacionados, independentemente do traço, através de uma equação apenas. Observando-se os resultados apresentados na Tabela 5.11, constata-se também que os valores do coeficiente de correlação do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$ são iguais ou ligeiramente superiores aos apresentados pelo modelo $f_t = A + B f_c$. Assim, semelhantemente ao estudo da correlação do módulo de elasticidade e a resistência à compressão, dar-se-á prosseguimento a esta análise estatística apenas para o modelo de equação que relaciona as variáveis f_t e $\sqrt{f_c}$.

Desta forma, os limites superior e inferior das intervalos de confiança dos interceptos e dos coeficientes angulares foram computados para verificar se esses intervalos sobrepõem-se total ou parcialmente. Adotou-se também um coeficiente de confiança igual a 0,95, assim como foi adotado para o estudo do módulo de elasticidade. Os valores desses limites estão apresentados na Tabela 5.12 e representados, graficamente, nas Figuras 5.31 e 5.32.

Tabela 5.12 - Limites superior e inferior dos interceptos e dos coeficientes angulares do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$, para cada traço

Traço	Intercepto A		Coeficiente Angular B	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
A (30 MPa)	-2,43	1,18	0,30	1,04
B (50 MPa)	-1,11	1,73	0,31	0,72
C (55 MPa)	-1,28	3,49	0,13	0,79
D (60 MPa)	-2,41	5,13	-0,08	0,95

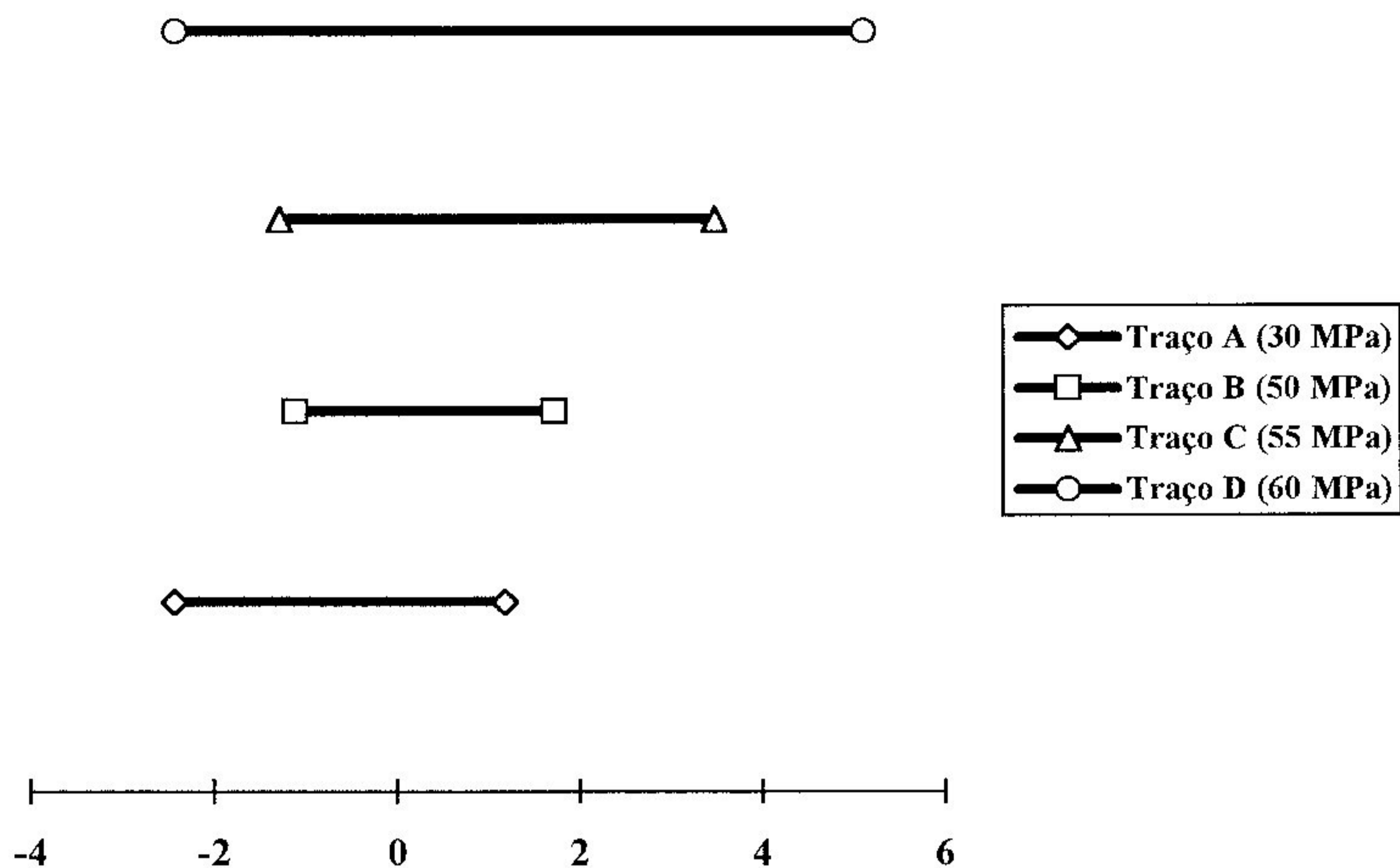


Figura 5.31 - Intervalos de confiança dos interceptos do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$

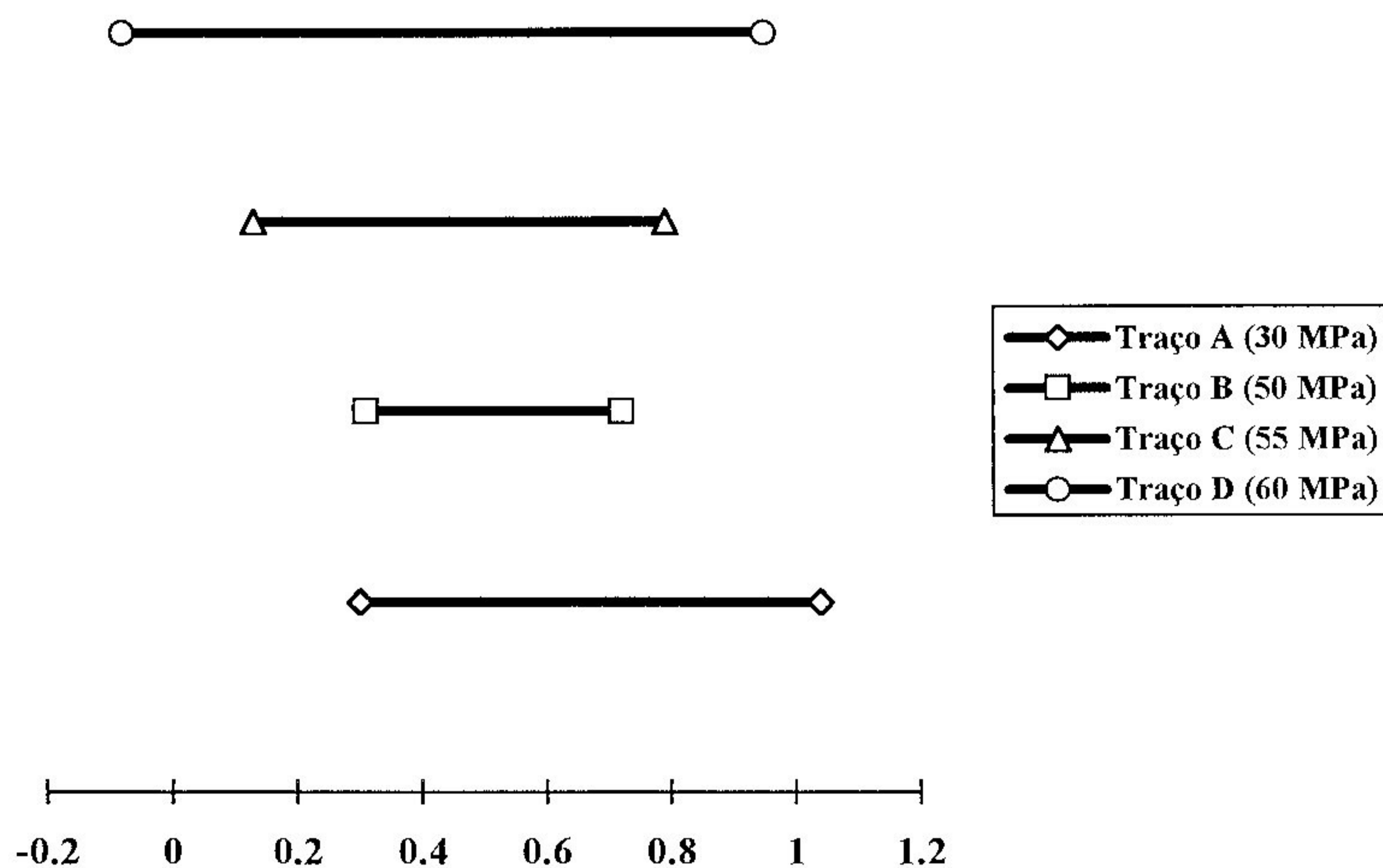


Figura 5.32 - Intervalos de confiança dos coeficientes angulares do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$

Observando-se as Figuras 5.31 e 5.32, constata-se que os intervalos de confiança calculados, tanto para os interceptos como para os coeficientes angulares, sobrepõem, uns aos outros, parcialmente, dentro de uma limitada faixa. Diante deste fato, pode-se dizer, então, que todos os dados apresentados na Tabela 5.10 pertencem a uma única população. Conseqüentemente, a resistência à tração de concretos de diferentes traços e diferentes idades pode ser expressa em termos da raiz quadrada da resistência à compressão através de uma única equação. Assim sendo, os parâmetros estatísticos do modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$ foram computados para toda a população de dados. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.13, apresentada a seguir. A curva obtida pode ser visualizada na Figura 5.33.

Tabela 5.13 - Parâmetros estatísticos associados ao modelo $f_t = A + B \sqrt{f_c}$, quando aplicado a todos os dados

Parâmetro A			Parâmetro B			Coef. Correl. R	Desvio Padrão s
A	Limite Inferior	Limite Superior	B	Limite Inferior	Limite Superior		
-0,51	-1,18	0,17	0,67	0,56	0,77	0,95	0,31

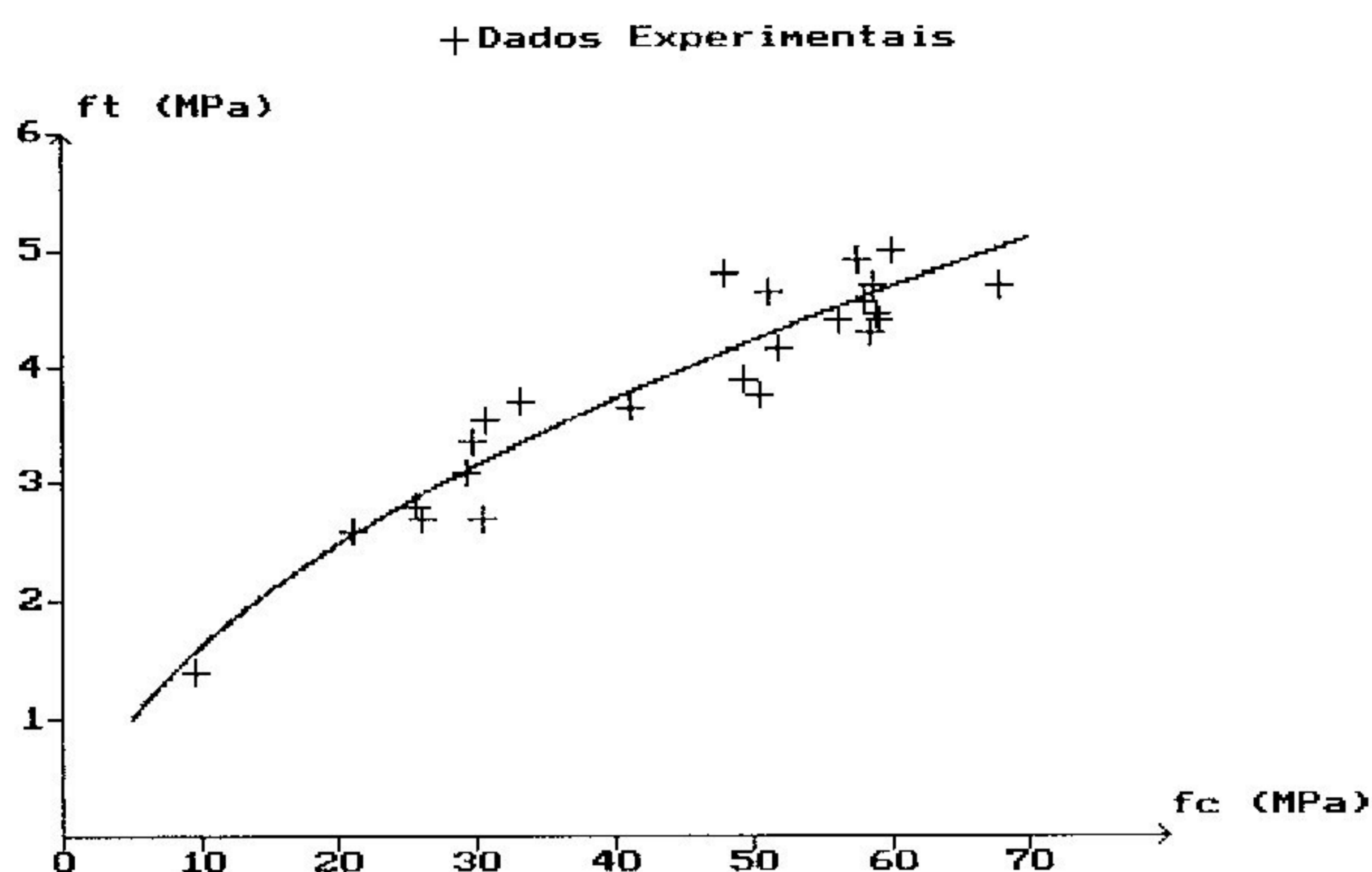


Figura 5.33 - Resistência à tração x raiz quadrada da resistência à compressão
(Todos os traços)

Portanto, baseado nesta análise, adotar-se-á a seguinte expressão matemática para se relacionar a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, e a raiz quadrada da resistência à compressão:

$$f_t = -0,51 + 0,67 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa}) \quad (5.3)$$

(10 MPa < f_c < 70 MPa)

Novamente, deve-se esclarecer que, a validade da equação acima está limitada aos valores mínimo e máximo da resistência à compressão aqui determinados, ou seja, a equação (5.3) é válida apenas para valores de resistência à compressão compreendidos entre 10 MPa e 70 MPa.

Assim como a equação (5.1), a equação (5.3) foi igualmente testada quanto a sua capacidade de ajustar a dados diferentes daqueles a partir dos quais ela foi deduzida. Para essa avaliação, coletou-se resultados experimentais encontrados em alguns trabalhos citados no capítulo 2, [20] [10] [19] [26] [29] [31]. Em seguida, aplicou-se a expressão (5.3) aos vários conjuntos de dados encontrados e as relações entre o valor por ela previsto e o valor real, obtido em

ensaio, foram determinadas. Esta análise também foi realizada empregando-se a equação do ACI 363/92. Os resultados, assim obtidos, encontram-se apresentados nas Tabelas C.6 a C.12 do Apêndice C. A Figura 5.34 ilustra, graficamente, os resultados apresentados nessas tabelas.

A Tabela 5.14 contém, para cada conjunto de dados encontrado na literatura pesquisada, os valores médios da relação entre o valor calculado e aquele observado pelo autor, bem como os coeficientes de variação dos resultados obtidos.

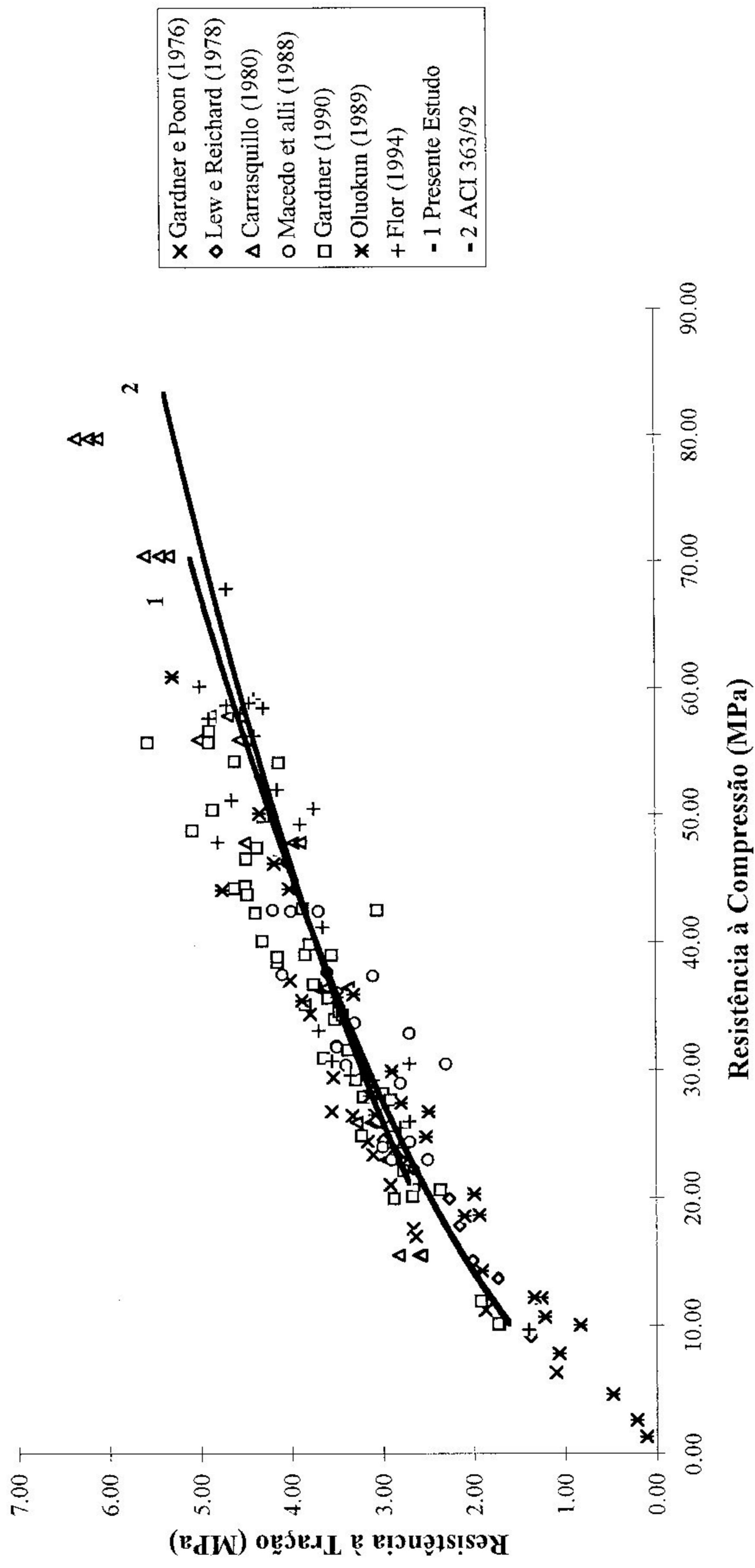


Figura 5.34 - Comparação entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente e os valores previstos por algumas equações

Tabela 5.14 - Tabela geral dos resultados obtidos na análise comparativa entre os valores da resistência à tração obtidos experimentalmente e os valores previstos por algumas equações

Autor	Faixa de f_c (MPa)	Presente Estudo		ACI 363 / 92	
		10 MPa < f_c < 70 MPa		21 MPa < f_c < 83 MPa	
		Média cal/obs	Coef. Var. (%)	Média cal/obs	Coef. Var. (%)
Gardner e Poon	6 a 37	0,880	12,266	0,906	9,632
Lew e Reichard	9 a 25	1,045	8,018	1,012	3,055
Carrasquillo	16 a 58	0,940	9,623	0,969	5,451
Macedo <i>et alli</i>	23 a 43	1,022	12,249	1,042	13,090
Gardner	10 a 57	0,943	9,615	0,947	10,033
Oluokun	1 a 61	1,106	25,839	1,009	10,289
Flor	10 a 68	1,014	8,033	1,008	8,048
Todos	1 a 68	0,991	13,801	0,984	9,647

Uma análise global da Tabela 5.14, conjuntamente com a observação da Figura 5.34, revela que a equação (5.3) e a expressão recomendada pelo ACI 363/92 apresentaram resultados bastante semelhantes em cada um dos conjuntos de dados relacionados, com exceção do conjunto de resultados obtidos por Oluokun [31]. Somente para esse conjunto de dados, essas duas equações apresentaram resultados bastante discrepantes. A equação do presente estudo apresentou uma média entre o valor calculado e o valor observado obtido em ensaios igual a 1,106, superestimando, em média, os resultados experimentais em 11%. O coeficiente de variação dos resultados foi também o maior encontrado: 26%. Entretanto, praticamente nenhuma diferença foi obtida entre os valores da resistência à tração previstos pela equação do ACI 363/92 e aqueles obtidos experimentalmente por esses autores.

Outro conjunto de resultados que não apresentou boa correlação com os resultados previstos por essas duas equações foi o de Gardner e Poon [19]. A

equação (5.3) subestima os valores da resistência à tração em 12%, em média, enquanto que, para a equação do ACI 363/92, esse valor caiu para 9%. Para os demais conjuntos, tais expressões apresentaram melhor grau de ajustamento aos dados experimentais de diferentes pesquisadores.

Na média geral, ou seja, analisando-se simultaneamente todos os dados, ambas as equações apresentaram um excelente grau de ajustamento aos resultados de ensaios coletados na literatura pesquisada. Ambas apresentaram-se conservadoras ao preverem o valor da resistência à tração a partir da resistência à compressão: a equação do presente estudo subestimou os valores da resistência à tração em apenas 1%, em média, enquanto a equação proposta pelo ACI 363/92 subestimou os resultados experimentais em 2%, em média. Constata-se, então, que a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, pode ser relacionada à resistência à compressão elevada à potência 0,5 com uma boa precisão.

Novamente, faz-se necessário esclarecer que a análise comparativa, aqui apresentada, foi realizada independentemente da diversidade dos materiais utilizados na fabricação dos concretos. Adicionalmente, não se fez distinção dos dados em função das diferentes idades de ensaio e das diferentes dimensões dos corpos-de-prova.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

6.1 Introdução

O principal objetivo do presente trabalho foi estudar as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência, fabricados com cimento de alta resistência inicial e brita calcárea, a baixas idades. Investigou-se a resistência à compressão uniaxial, o módulo de elasticidade estático secante e a resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, de concretos com resistência à compressão esperada aos 28 dias de 30, 50, 55 e 60 MPa, nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias após a sua execução. O valor das propriedades, em cada uma das idades investigadas, foi avaliado através de ensaios, realizados de acordo com as especificações da ABNT. A análise dos resultados incluiu um estudo da evolução das propriedades ao longo do tempo, bem como um estudo da correlação entre elas.

6.2 Conclusões

Baseando-se nos resultados apresentados nesta pesquisa para concretos com resistência à compressão entre 10 e 70 MPa, as seguintes conclusões podem ser relatadas:

1. Até a idade de 28 dias, a resistência à compressão uniaxial de concretos de alta resistência, fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial, evolui mais rapidamente que a de concretos de resistência normal, também fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial.

2. Entre as idades de 3 e 28 dias, tanto o módulo de elasticidade estático secante, como a resistência à tração, determinada por compressão diametral, evoluíram semelhantemente nos concretos de alta resistência e de resistência normal, ambos fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial. Entretanto, até a idade de 3 dias, essas duas propriedades apresentaram taxas de crescimento maiores para os concretos de alta resistência.

3. Para concretos fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial, observou-se que, nas primeiras 24 horas, as diferentes propriedades mecânicas apresentaram taxas de crescimento distintas, sendo que o módulo de elasticidade e a resistência à tração evoluíram mais rapidamente que a resistência à compressão.

4. Na produção de concretos, o emprego de um consumo mais elevado de cimento, associado a um reduzido fator água/cimento, reflete numa sensível melhoria das propriedades mecânicas. Entretanto, essa melhoria não se apresenta, semelhantemente, nessas propriedades, ou seja, o aumento obtido para a resistência à compressão uniaxial não é diretamente proporcional ao aumento do módulo de elasticidade e da resistência à tração.

5. Um consumo de cimento acima de 600 kg/m^3 na fabricação de concretos não melhora, significativamente, as propriedades mecânicas desses concretos.

6. A equação da norma brasileira NBR 6118/80, substancialmente, superestima o valor do módulo de elasticidade estático secante, para concretos apresentando resistências à compressão mais elevadas. Para concretos de peso específico normal, a seguinte expressão pode ser empregada para se estimar o módulo de elasticidade estático secante a partir da resistência à compressão uniaxial:

$$E_c = 6654 + 3261 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa})$$

$$(10 \text{ MPa} < f_c < 70 \text{ MPa})$$

7. A resistência à tração de concretos de peso específico normal, determinada pelo ensaio de compressão diametral, pode ser estimada com boa precisão, em função da resistência à compressão uniaxial, pela seguinte expressão:

$$f_t = -0,51 + 0,67 \sqrt{f_c} \quad (\text{em MPa})$$

$$(10 \text{ MPa} < f_c < 70 \text{ MPa})$$

6.3 Recomendações

Baseado nas observações apresentadas neste trabalho, faz-se as seguintes recomendações para pesquisas futuras sobre os concretos de alta resistência:

1. Concretos com resistência à compressão esperada aos 28 dias superior a 60 MPa devem ser estudados. O emprego de adições minerais como a microssilica substituindo, parcialmente, o cimento é sugerido para alcançar resistências à compressão tão elevadas. Adicionalmente, seria interessante investigar a existência de um consumo de cimento ótimo que refletisse numa máxima melhoria das propriedades mecânicas dos concretos.

2. A evolução das propriedades mecânicas, bem como a correlação entre elas, devem ser investigadas para concretos fabricados com diferentes tipos de cimento e agregados graúdos. Adicionalmente, esses estudos devem estender-se, desde as primeiras idades, após a fabricação dos concretos, até idades superiores a 56 dias.

3. A relação entre a resistência à compressão obtida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm e em cilindros de 150 mm x 300 mm ainda não se encontra completamente elucidada, especialmente para os concretos de alta resistência. Estudos devem ser direcionados de modo a gerar maiores informações sobre o fator de conversão entre os valores da resistência à compressão obtidos em corpos-de-prova de diferentes dimensões. O crescente interesse pelo emprego de concretos de resistências mais elevadas e a capacidade limitada das prensas de ensaios são fatos reais que, quando combinados, sugerem, cada vez mais, o uso de corpos-de-prova de menores dimensões na avaliação das propriedades mecânicas.

4. Apesar do ensaio de flexão de vigas para a determinação da resistência à tração empregar um consumo maior de materiais para a fabricação dos corpos-de-prova, o estudo da evolução dessa propriedade e da sua correlação com resultados de ensaios à compressão uniaxial pode ser de grande utilidade no controle tecnológico da execução de pavimentos rígidos de concreto.

5. A influência das características dos agregados no comportamento dos concretos de alta resistência necessita de estudos mais aprofundados. Variações de parâmetros dos agregados como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a composição granulométrica, a forma, a textura e a natureza mineralógica devem ser testadas de modo a identificar suas influências na qualidade dos concretos de alta resistência.

6. Uma tecnologia alternativa promissora é a utilização combinada do concreto de alta resistência com fibras objetivando-se uma melhoria na ductilidade desse concreto. Um estudo dentro desta linha de pesquisa é fortemente recomendado.

7. Finalmente, especial atenção deve ser dada às propriedades mecânicas nas idades inferiores a 28 dias. As propriedades do concreto nessas idades foi o tema de uma conferência em Santa Bárbara, CA, em 1988 [25]. As recomendações dessa conferência incluem a necessidade de rever as normas e os métodos de ensaio quanto a sua aplicabilidade a baixas idades e aumentar os esforços para a conscientização dos técnicos, engenheiros e projetistas da importância do período compreendido entre o lançamento do concreto e a idade de 28 dias.

Referências Bibliográficas

- [1] ACI Committee 363, “State of the Art Report on High Strength Concrete”, Report No. ACI 363R-84, ACI Journal, Vol. 81, No. 4, July-August 1984, p. 304-411.
- [2] ACI Committee 363, “State of the Art Report on High Strength Concrete”, Report No. ACI 363R-92, ACI, 1992, 55 p.
- [3] FIP/CEB Working Group on High Strength Concrete, “High Strength Concrete - State of the Art Report”, Bulletin D'Information No. 197, August 1990, 61 p.
- [4] Amaral Filho, E. M. do, “Concreto de Alta Resistência (1ª Parte)”, Revista IBRACON, Ano II, No. 4, Abril-Maio-Junho 1992, p. 40-49.
- [5] Pinto, A. D., e Rochlitz, R. C., “O Concreto de Alta Resistência do Edifício Trianon - MASP”, Apresentado na Reunião Anual do IBRACON - Colóquio sobre Dosagem do Concreto, São Paulo, Maio 1977, p. 1-14.
- [6] Ferraz, J. C. F., “O Concreto de Alta Resistência e a Estrutura do Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand”, Apresentado na Reunião Anual do IBRACON - Colóquio sobre Concretos de Alta Resistência, Rio de Janeiro, Agosto 1988, p. 1-7.

- [7] Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete", *PCI Journal*, November-December 1985, p. 92-119.
- [8] Kaminetzky, D., and Stivaros, P. C., "Early Age Concrete: Construction Loads, Behavior, and Failures", *Concrete International*, January 1994, p. 58-63.
- [9] Fu, H. C., and Gardner, N. J., "Effect of High Early Age Construction Loads on the Long Term Behavior of Slab Structures", *ACI Special Publication 95-10*, 1986, p. 173-201.
- [10] Carrasquillo, R. L., "Microcracking and Engineering Properties of High Strength Concrete", *Research Report No.80-1*, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, February 1980, 254 p.
- [11] Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads", *ACI Journal*, Vol. 78, No. 3, May-June 1981, p. 171-178., and Discussion, Vol. 79, No. 2, March-April 1982, p. 162-163.
- [12] Nilson, A. H., "Design Implications of Current Research on High Strength Concrete", *ACI Special Publication 87-7*, 1985, p. 85-118.
- [13] Thoman, W. H., and Raeder, W., "Ultimate Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Portland Cement Concrete", *ACI Journal*, Vol. 30, No. 3, January-February 1934, p. 231-238.

- [14] Pauw, A., "Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density", *ACI Journal*, Vol. 57, No. 6, December 1960, p. 679-688.
- [15] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary-ACI 318R-89", American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1989.
- [16] Parrot, L. J., "The Selection of Constituents and Proportions for Producing Concrete with a Compressive Strength of 80 to 110 N/mm² (11600 to 15900 lbf/in²)", Technical Report TRA 416, Cement and Concrete Association, 1969, p. 1-12.
- [17] Parrot, L. J., "The Properties of High Strength Concrete", Technical Report TRA 417, Cement and Concrete Association, May 1969, p. 1-13.
- [18] Parrot, L. J., "The Production and Properties of High Strength Concrete", *Concrete*, November 1969, p. 443-448.
- [19] Gardner, N. J., and Poon, S. M., "Time and Temperature Effects on Tensile, Bond, and Compressive Strength", *ACI Journal*, Vol. 73, No. 7, July 1976, p. 405-409.
- [20] Lew, H. S., and Reichard, T. W., "Mechanical Properties of Concrete at Early Ages", *ACI Journal*, Vol. 75, No. 10, October 1978, p. 533-542.

- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - Procedimento”, Novembro 1980, 76 p.
- [22] Carino, N. J., and Lew, H. S., “Re-examination of the Relation Between Splitting Tensile and Compressive Strength of Normal Weight Concrete”, *ACI Journal*, Vol. 79, No. 3, May-June 1982, p. 214-219.
- [23] Date, C. G., and Schnormeier, R. H., “Use of Prediction Relations”, *ACI Journal*, Vol. 82, No. 4, July-August 1985, p.525-530.
- [24] Swamy, R. N., “High Strength Concrete - Material Properties and Structural Behavior”, *ACI Special Publication 87-8*, 1985, p. 119-146.
- [25] Carino, N. J., Jennings, H. J. M., and Snell, L. M., “Properties of Concrete at Early Ages”, *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP*, Vol. 11, No. 2, Winter 1989, p. 129-131.
- [26] Macedo, P. H. S., Ferreira Júnior, S., Andrade Filho, S. A. de, Grossi, L. C., e Balthazar, M. A. B., “Estudo de Correlações entre as Resistências do Concreto à Compressão Axial, Compressão Diametral e Flexão, em Função do Tipo de Textura Superficial do Agregado Graúdo”, Apresentado na 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, Outubro 1988, p. 1029-1050.

- [27] Shih, T. S., Lee, G. C., and Chang, K. C., "On Static Modulus of Elasticity of Normal-Weight Concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 10, October 1989, p. 2579-2587.
- [28] Held, M., "Mechanical Properties of High Strength Concrete (HSC)", *Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures*, Vol. 4, 1989, p. 71-79.
- [29] Gardner, N. J., "Effect of Temperature on the Early Age Properties of Type I, Type III, and Type I/Fly Ash Concretes", *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 1, January-February 1990, p. 68-78.
- [30] CEB, "CEB-FIP Model Code 1990 - Final Draft", Lausanne, Switzerland, July 1991.
- [31] Oluokun, F. A., "Investigation of Physical Properties of Concrete at Early Ages", Ph. D. Dissertation, University of Tennessee, Knoxville, May 1989, 207 p.
- [32] Oluokun, F. A., Burdette, E. G., and Deatherage, J. H., "Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Compressive Strength Relationships at Early Ages", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, January-February 1991, p. 3-10.
- [33] Oluokun, F. A., Burdette, E. G., and Deatherage, J. H., "Splitting Tensile Strength and Compressive Strength Relationship at Early Ages", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 2, March-April 1991, p. 115-121.

- [34] Baalbaki, W., Aïtcin, P-C, and Ballivy, G., “On Predicting Modulus of Elasticity in High Strength Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 5, September-October 1992, p. 517-520.
- [35] Aïtcin, P-C., “How to Produce High Strength Concrete”, *Concrete Construction*, Vol. 25, No. 3, March 1980, p. 222-230.
- [36] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5738 - Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos - Procedimento”, Janeiro 1984, 11 p.
- [37] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5739 - Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos de Concreto - Método de Ensaio”, Novembro 1980, 3 p.
- [38] Price, W. H., “Factors Influencing Concrete Strength”, *ACI Journal*, Vol. 47, No. 6, February 1951, p. 417-432.
- [39] Carrasquillo, P. M., and Carrasquillo, R. L., “Evaluation of the Use of Current Practice in the Production of High Strength Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 1, January-February 1988, p. 49-54.
- [40] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 8522 - Concreto - Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão-Deformação - Método de Ensaio”, Maio 1984, 9 p.

- [41] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 469-81 - Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", 1983 Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, 1983, 5 p.
- [42] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 7222 - Argamassas e Concretos - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos - Método de Ensaio", Janeiro 1983, 3 p.
- [43] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 496-71 - Standard Test Method for Splitting Strength of Cylindrical Concrete Specimens", 1983 Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, 1983, 7 p.
- [44] Drater, N. R., and Smith, H., "Applied Regression Analysis", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1981
- [45] Spiegel, M. R., "Estatística", Ao Livro Técnico S. A., Rio de Janeiro, 1970, 580 p.
- [46] Pereira, S. S. R., "ANDA - Sistema de Análise de Dados", Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Dezembro, 1993.
- [47] Palermo, G., "Concreto de Alta Resistência Proporciona Ganhos às Obras de Metrô", Revista IBRACON, Ano II, No. 6, Outubro/Novembro/Dezembro 1992, p. 13-20.

- [48] Souza, F. L. S., e Dantas, F. A. S., “Aumentando a Resistência”, Revista IBRACON, Ano I, No. 1, Julho/Agosto 1991, p. 24-27.
- [49] Agnesini, M. V. C., e Silva, L. F., “Determinação da Resistência à Compressão do Concreto, Empregando-se Corpos-de-Prova Cilíndricos de Dimensões Reduzidas”, Anais do 11º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Vol. 2, Águas de São Pedro, São Paulo, 11 a 14 de Dezembro, 1994, p. 1325-1328.

Apêndice A

Resultados dos Ensaios de Módulo de Elasticidade

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 1 dia

Traço: A											
Idade: 1 dia											
Resistência à Compressão Média: 9,7 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	*	0	*				
9	0,5	0,084221	0,061073	0,042111	*	0,084221	*				
16	0,9	0,084221	0,101789	0,063166	*	*	*				
24	1,4	0,105277	0,122147	0,063166	*	0,147387	*				
32	1,8	0,147387	0,183220	0,126332	*	0,168443	*				
40	2,3	0,168443	0,203578	0,147387	*	0,210553	*				
48	2,7	0,273719	0,244293	0,168443	*	0,252664	*				
56	3,2	0,315830	0,244293	0,189498	*	0,315830	*				
64	3,6	0,336885	0,285009	0,231609	*	0,378996	*				
72	4,1	0,400051	0,305367	0,273719	*	0,400051	*				
80	4,5	0,442162	0,346082	0,315830	*	0,463218	*				
88	5,0	0,505328	0,407156	0,357941	*	0,568494	*				
96	5,4	0,589550	0,447871	0,421107	*	0,631660	*				
104	5,9	0,652716	0,488587	0,442162	*	0,694826	*				
112	6,3	0,736937	0,549660	0,505328	*	0,779048	*				
120	6,8	0,842214	0,631091	0,568494	*	0,884324	*				
128	7,2	0,989601	1,017889	0,652716	*	1,031712	*				

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 3 dias

Traço: A											
Idade: 3 dias											
Resistência à Compressão Média: 21,1 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0				
9	0,5	0,021055	0,020358	0,042111	0,081431	0,042111	0,040716				
19	1,1	0,063166	0,061073	0,063166	0,142505	0,063166	0,040716				
30	1,7	*	*	*	*	0,084221	0,061073				
38	2,2	0,105277	0,061073	0,105277	0,142505	0,147387	0,081431				
57	3,2	0,126332	0,081431	0,147387	0,183220	0,168443	0,122147				
76	4,3	0,189498	0,122147	0,189498	0,223936	0,252664	0,183220				
95	5,4	0,231609	0,162862	0,252664	0,264651	0,315830	0,183220				
114	6,5	0,315830	0,223936	0,315830	0,305367	0,400051	0,244293				
133	7,5	0,357941	0,305367	0,357941	0,346082	0,463218	0,305367				
152	8,6	0,421107	0,366440	0,421107	0,427514	0,526384	0,366440				
171	9,7	0,505328	0,427514	0,484273	0,508945	0,610605	0,427514				
190	10,8	0,568494	0,570018	0,568494	0,590376	0,694826	0,529302				
209	11,8	0,631660	0,692165	0,673771	0,671807	0,779048	0,570018				
228	12,9	0,715882	0,773596	0,736937	0,732880	0,863269	0,610734				
247	14,0	0,779048	0,916100	0,821158	0,834669	0,989601	0,692165				
266	15,1	0,926435	1,017889	0,968546	0,895743	1,094878	0,753238				
285	16,1	0,989601	1,180752	1,073822	1,017889	1,221210	0,936458				
304	17,2	1,115933	1,302898	1,242265	1,180752	1,410708	1,160394				

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 7 dias

Traço: A										
Idade: 7 dias										
Resistência à Compressão Média: 25,5 MPa										
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 3 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)			
0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0
9	0,5	0	0,061073	0,021055	0,061073	0,021055	0,040716	*	0,040716	0,040716
23	1,3	0,021055	0,101789	0,042111	0,101789	0,042111	0,081431	*	0,081431	0,081431
30	1,7	*	*	0,063166	*	0,063166	0,081431	*	0,081431	0,101789
40	2,3	*	*	0,084221	*	0,084221	0,142505	*	0,142505	*
46	2,6	0,061660	0,101789	*	0,101789	*	*	*	*	0,101789
69	3,9	0,105277	0,101789	0,168443	0,101789	0,168443	0,162862	*	0,162862	0,162862
92	5,2	0,168443	0,122147	0,210553	0,122147	0,210553	0,162862	*	0,162862	0,162862
115	6,5	0,210553	0,162862	0,252664	0,162862	0,252664	0,223936	*	0,223936	0,203578
138	7,8	0,252664	0,223936	0,294775	0,223936	0,294775	0,264651	*	0,264651	0,264651
161	9,1	0,294775	0,264651	0,336885	0,264651	0,336885	0,305367	*	0,305367	0,346082
184	10,4	0,336885	0,366440	0,400051	0,366440	0,400051	0,366440	*	0,366440	0,386798
207	11,7	0,400051	0,386798	0,442162	0,386798	0,442162	0,407156	*	0,407156	0,468229
230	13,0	0,442162	0,468229	0,505328	0,468229	0,505328	0,468229	*	0,468229	0,488587
253	14,3	0,463218	0,549660	0,568494	0,549660	0,568494	0,508945	*	0,508945	0,508945
276	15,6	0,526384	0,651449	0,652716	0,651449	0,652716	0,590376	*	0,590376	0,570018
299	16,9	0,589550	0,875385	0,715882	0,875385	0,715882	0,692165	*	0,692165	0,610734
322	18,2	0,652716	1,099320	0,800103	1,099320	0,800103	0,753238	*	0,753238	0,631091
345	19,5	0,715882	1,343614	0,863269	1,343614	0,863269	0,875385	*	0,875385	0,651449
368	20,8	0,779048	1,608265	0,947490	1,608265	0,947490	0,977174	*	0,977174	0,793954

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.4 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 14 dias

Traço: A									
Idade: 14 dias									
Resistência à Compressão Média: 26,0 MPa									
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,040716	0,042111	0,081431	0,042111	0,081431	0,021055	0,040716
23	1,3	0,042111	0,081431	0,063166	0,122147	0,063166	0,122147	0,042111	0,142505
30	1,7	0,063166	0,101789	0,084221	0,142505	0,084221	0,142505	*	*
46	2,6	0,084221	0,101789	0,126332	0,183220	0,126332	0,183220	0,084221	0,162862
69	3,9	0,147387	0,162862	0,210553	0,244293	0,210553	0,244293	0,126332	0,223936
92	5,2	0,189498	0,223936	0,252664	0,264651	0,252664	0,264651	0,168443	0,305367
115	6,5	0,231609	0,285009	0,315830	0,285009	0,315830	0,285009	0,210553	0,386798
138	7,8	0,294775	0,325725	0,378996	0,305367	0,378996	0,305367	0,231609	0,488587
161	9,1	0,357941	0,427514	0,442162	0,346082	0,442162	0,346082	0,273719	0,570018
184	10,4	0,400051	0,488587	0,547439	0,366440	0,547439	0,366440	0,357941	0,651449
207	11,7	0,463218	0,570018	0,589550	0,407156	0,589550	0,407156	0,378996	0,712523
230	13,0	0,526384	0,671807	0,631660	0,447871	0,631660	0,447871	0,442162	0,834669
253	14,3	0,568491	0,753238	0,715882	0,488587	0,715882	0,488587	0,463218	0,936458
276	15,6	0,631660	0,855027	0,757992	0,529302	0,757992	0,529302	0,505328	1,038247
299	16,9	0,694826	0,936458	0,842214	0,590376	0,842214	0,590376	0,568494	1,119678
322	18,2	0,757992	1,038247	0,926435	0,631091	0,926435	0,631091	0,631660	1,262183
345	19,5	0,821158	1,140036	1,010656	0,671807	1,010656	0,671807	0,673771	1,384329
368	20,8	0,926435	1,282541	1,094878	0,712523	1,094878	0,712523	0,694826	1,648981

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.5 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 28 dias

Traço: A										
Idade: 28 dias										
Resistência à Compressão Média: 30,5 MPa										
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 3 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,042111	0,081431	0,021055	0,020358	0,042111	0,040716			
20	1,1	0,063166	0,101789	0,021055	0,061073	0,063166	0,061073			
27	1,5	0,084221	0,122147	0,042111	0,101789	0,063166	0,081431			
40	2,3	0,105277	0,142505	0,063166	0,122147	0,105277	0,122147			
54	3,1	0,147387	0,162862	0,084221	0,223936	0,105277	0,162862			
81	4,6	0,231609	0,264651	0,105277	0,264651	0,168443	0,244293			
108	6,1	0,294775	0,305367	0,126332	0,305367	0,210553	0,325725			
135	7,6	0,378996	0,366440	0,168443	0,366440	0,252664	0,386798			
162	9,2	0,463218	0,447871	0,210553	0,427514	0,294775	0,488587			
189	10,7	0,526384	0,529302	0,252664	0,529302	0,357941	0,651449			
216	12,2	0,631660	0,651449	0,273719	0,610734	0,400051	0,732880			
243	13,8	0,736937	0,732880	0,294775	0,671807	0,442162	0,875385			
270	15,3	0,821158	0,814311	0,336885	0,753238	0,505328	0,936458			
297	16,8	0,905380	0,895743	0,357941	0,855027	0,547439	1,038247			
324	18,3	0,989601	1,017889	0,400051	0,956816	0,610605	1,160394			
351	19,9	1,052767	1,078963	0,463218	1,058605	0,652716	1,302898			
378	21,4	1,115933	1,180752	0,505328	1,180752	0,673771	1,404687			

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.6 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço A na idade de 56 dias

Traço: A		Resistência à Compressão Média: 29,6 MPa								
Idade: 56 dias		Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação (x 10 ⁻³)
				Deformação (x 10 ⁻³) 1	Deformação (x 10 ⁻³) 2	Deformação (x 10 ⁻³) 1	Deformação (x 10 ⁻³) 2	Deformação (x 10 ⁻³) 1	Deformação (x 10 ⁻³) 2	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0,5	0	0,020358	0,021055	0,061073	0,021055	0,021055	0,040716	
	20	1,1	0,021055	0,081431	0,042111	0,101789	0,021055	0,021055	0,061073	
	26	1,5	*	*	*	*	*	0,042111	0,081431	
	40	2,3	0,042111	0,122147	0,063166	0,101789	0,063166	*	*	
	52	2,9	0,084221	0,203578	0,084221	0,142505	0,063166	0,063166	0,101789	
	78	4,4	0,105277	0,264651	0,105277	0,183220	0,105277	0,105277	0,142505	
	104	5,9	0,168443	0,305367	0,168443	0,223936	0,168443	0,147387	0,183220	
	130	7,4	0,210553	0,468229	0,210553	0,285009	0,210553	0,189498	0,264651	
	156	8,8	0,231609	0,468229	0,252664	0,346082	0,252664	0,252664	0,285009	
	182	10,3	0,252664	0,549660	0,336885	0,427514	0,336885	0,294775	0,366440	
	208	11,8	0,294775	0,651449	0,400051	0,488587	0,400051	0,336885	0,447871	
	234	13,2	0,336885	0,753238	0,463218	0,549660	0,463218	0,400051	0,508945	
	260	14,7	0,378996	0,875385	0,526384	0,610734	0,526384	0,547439	0,631091	
	286	16,2	*	*	0,589550	0,692165	0,589550	0,631660	0,732880	
	312	17,7	*	*	0,652716	0,793954	0,652716	0,736937	0,834669	
	338	19,1	*	*	0,694826	0,875385	0,694826	0,863269	0,997532	
	364	20,6	*	*	0,779048	0,977174	0,779048	0,989601	1,099320	
	390	22,1	*	*	0,884324	1,09932	0,884324	1,094878	1,241825	
	416	23,5	*	*	1,010656	1,221467	1,010656	1,242265	1,425045	

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.7 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 1 dia

Traço: B										
Idade: 1 dia										
Resistência à Compressão Média: 29,2 MPa										
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3				
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,081431	0,021055	0,020358	0,021055	0,021055	0,021055	0,021055	0,061073
26	1,5	0,042111	0,122147	0,084221	0,061073	0,084221	0,061073	0,042111	0,042111	0,081431
52	2,9	0,084221	0,162862	0,168443	0,142505	0,168443	0,142505	0,084221	0,084221	0,162862
78	4,4	0,126332	0,223936	0,231609	0,162862	0,231609	0,162862	0,126332	0,126332	0,244293
104	5,9	0,189498	0,285009	0,315830	0,203578	0,315830	0,203578	0,168443	0,168443	0,305367
130	7,4	0,252664	0,366440	0,400051	0,264651	0,400051	0,264651	0,231609	0,231609	0,366440
156	8,8	0,315830	0,468229	0,505328	0,264651	0,505328	0,264651	0,294775	0,294775	0,447871
182	10,3	0,378996	0,549660	0,610605	0,325725	0,610605	0,325725	0,357941	0,357941	0,508945
208	11,8	0,442162	0,671807	0,694826	0,346082	0,694826	0,346082	0,421107	0,421107	0,570018
234	13,2	0,505328	0,712523	0,800103	0,386798	0,800103	0,386798	0,505328	0,505328	0,712523
260	14,7	0,610605	0,814311	0,926435	0,427514	0,926435	0,427514	0,568494	0,568494	0,793954
286	16,2	0,673771	0,875385	1,052767	0,447871	1,052767	0,447871	0,652716	0,652716	0,916100
312	17,7	0,779048	0,997532	1,200154	0,468229	1,200154	0,468229	0,736937	0,736937	1,017889
338	19,1	0,863269	1,058605	1,326486	0,488587	1,326486	0,488587	0,800103	0,800103	1,119678
364	20,6	0,947490	1,119678	1,494929	0,508945	1,494929	0,508945	0,884324	0,884324	1,241825
390	22,1	1,052767	1,221467	1,684427	0,508945	1,684427	0,508945	0,989601	0,989601	1,343614
416	23,5	1,179099	1,323256	1,916036	0,468229	1,916036	0,468229	1,073822	1,073822	1,465761

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.8 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 3 dias

Traço: B									
Idade: 3 dias									
Resistência à Compressão Média: 41,2 MPa									
Carga (P)	Tensão (σ)	CP 1			CP 2			CP 3	
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)
0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	*	0,040716	0,021055	0,040716	0,021055	0,021055	0,021055	0
36	2,0	*	0,122147	0,084221	0,122147	0,084221	0,063166	0,063166	0,101789
72	4,1	*	0,162862	0,147387	0,162862	0,147387	0,126332	0,126332	0,142505
108	6,1	*	0,223936	0,210553	0,223936	0,210553	0,189498	0,189498	0,203578
144	8,1	*	0,305367	0,294775	0,305367	0,294775	0,252664	0,252664	0,285009
180	10,2	*	0,386798	0,378996	0,386798	0,378996	0,315830	0,315830	0,346082
216	12,2	*	0,468229	0,442162	0,468229	0,442162	0,378996	0,378996	0,427514
252	14,3	*	0,529302	0,526384	0,529302	0,526384	0,442162	0,442162	0,508945
288	16,3	*	0,610734	0,589550	0,610734	0,589550	0,526384	0,526384	0,570018
324	18,3	*	0,712523	0,673771	0,712523	0,673771	0,589550	0,589550	0,671807
360	20,4	*	0,834669	0,757992	0,834669	0,757992	0,652716	0,652716	0,793954
396	22,4	*	0,936458	0,821158	0,936458	0,821158	0,736937	0,736937	0,916100
432	24,4	*	0,997532	0,905380	0,997532	0,905380	0,821158	0,821158	1,017889
468	26,5	*	1,099320	0,989601	1,099320	0,989601	0,884324	0,884324	1,140036
504	28,5	*	1,221467	1,073822	1,221467	1,073822	0,947490	0,947490	1,323256
540	30,6	*	1,343614	1,158044	1,343614	1,158044	1,031712	1,031712	1,404687
576	32,6	*	1,445403	1,284376	1,445403	1,284376	1,094878	1,094878	1,547192

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.9 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 7 dias

Traço: B											
Idade: 7 dias											
Resistência à Compressão Média: 51,9 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	*	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,021055	0,040716	0,021055	0,061073
20	1,1	0,042111	*	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,081431
30	1,7	0,063166	*	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	0,042111	0,081431	0,042111	0,101789
45	2,5	0,084221	*	0,084221	0,122147	0,105277	0,122147	0,063166	0,122147	0,063166	0,122147
90	5,1	0,168443	*	0,168443	0,203578	0,189498	0,203578	0,105277	0,203578	0,105277	0,183220
135	7,6	0,294775	*	0,294775	0,264651	0,273719	0,264651	0,168443	0,264651	0,168443	0,305367
180	10,2	0,378996	*	0,378996	0,325725	0,357941	0,325725	0,252664	0,325725	0,252664	0,346082
225	12,7	0,484273	*	0,484273	0,407156	0,463218	0,407156	0,315830	0,407156	0,315830	0,447871
270	15,3	0,589550	*	0,589550	0,488587	0,547439	0,488587	0,400051	0,488587	0,400051	0,570018
315	17,8	0,673771	*	0,673771	0,590376	0,631660	0,590376	0,484273	0,590376	0,484273	0,671807
360	20,4	0,779048	*	0,779048	0,692165	0,736937	0,692165	0,568494	0,692165	0,568494	0,773596
405	22,9	0,905380	*	0,905380	0,814311	0,842214	0,814311	0,652716	0,814311	0,652716	0,895743
450	25,5	1,010656	*	1,010656	0,936458	0,947490	0,936458	0,736937	0,936458	0,736937	0,977174
495	28,0	1,115933	*	1,115933	0,997532	1,052767	0,997532	0,800103	0,997532	0,800103	1,058605
540	30,6	1,263320	*	1,263320	1,119678	1,179099	1,119678	0,926435	1,119678	0,926435	1,221467
585	33,1	1,368597	*	1,368597	1,262183	1,305431	1,262183	1,010656	1,262183	1,010656	1,363972
630	35,7	*	*	1,452819	1,323256	1,452819	1,323256	1,136988	1,323256	1,136988	1,567550

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.10 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 14 dias

Traço: B									
Idade: 14 dias									
Resistência à Compressão Média: 50,5 MPa									
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)
		Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,042111	0,040716	0,021055	0,040716	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716
20	1,1	0,084221	0,061073	0,042111	0,061073	0,063166	0,040716	0,063166	0,040716
30	1,7	0,147387	0,081431	*	*	0,084221	*	0,084221	0,061073
44	2,5	*	*	0,063166	0,061073	0,126332	0,061073	0,126332	0,061073
60	3,4	0,126332	0,122147	0,105277	0,081431	0,147387	0,081431	0,147387	0,101789
88	5,0	0,168443	0,162862	0,126332	0,142505	0,189498	0,142505	0,189498	0,162862
132	7,5	0,231609	0,285009	0,231609	0,264651	0,294775	0,264651	0,294775	0,244293
176	10,0	0,336885	0,366440	0,336885	0,346082	0,400051	0,346082	0,400051	0,325725
220	12,4	0,442162	0,468229	0,421107	0,488587	0,463218	0,488587	0,463218	0,427514
264	14,9	0,484273	0,610734	0,547439	0,610734	0,547439	0,610734	0,547439	0,508945
308	17,4	0,589550	0,712523	0,652716	0,732880	0,652716	0,732880	0,652716	0,610734
352	19,9	0,800103	0,793954	0,736937	0,855027	0,652716	0,855027	0,652716	0,712523
396	22,4	0,926435	0,936458	0,842214	0,956816	0,779048	0,956816	0,779048	0,814311
440	24,9	1,052767	0,956816	0,989601	1,119678	0,863269	1,119678	0,863269	0,916100
484	27,4	1,179099	1,058605	1,073822	1,282541	0,905380	1,282541	0,905380	0,997532
528	29,9	1,347542	1,241825	1,200154	1,445403	0,863269	1,445403	0,863269	1,078963
572	32,4	1,537040	1,282541	1,305431	1,547192	0,800103	1,547192	0,800103	1,160394
616	34,5	1,705483	1,486118	1,431763	1,689696	*	1,689696	*	*

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.11 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 28 dias

Traço: B									
Idade: 28 dias									
Resistência à Compressão Média: 49,3 MPa									
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)		
0	0	0	0	0	0	0	0	*	*
9	0,5	0,021055	0,040716	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	*	*
20	1,1	0,042111	0,122147	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	*	*
30	1,7	0,063166	0,122147	0,063166	0,061073	0,063166	0,061073	*	*
44	2,5	0,084221	0,122147	*	*	*	*	*	*
88	5,0	0,147387	0,162862	0,168443	0,081431	0,168443	0,081431	*	*
132	7,5	0,231609	0,244293	0,252664	0,142505	0,252664	0,142505	*	*
176	10,0	0,315830	0,305367	0,357941	0,244293	0,357941	0,244293	*	*
220	12,4	0,400051	0,386798	0,421107	0,305367	0,421107	0,305367	*	*
264	14,9	0,505328	0,488587	0,526384	0,610734	0,526384	0,610734	*	*
308	17,4	0,547439	0,793954	0,589550	0,692165	0,589550	0,692165	*	*
352	19,9	0,673771	0,916100	0,673771	0,834669	0,673771	0,834669	*	*
396	22,4	0,715882	1,099320	0,757992	0,956816	0,757992	0,956816	*	*
440	24,9	0,800103	1,262183	0,842214	1,119678	0,842214	1,119678	*	*
484	27,4	0,884324	1,404687	0,926435	1,262183	0,926435	1,262183	*	*
528	29,9	0,947490	1,567550	0,989601	1,384329	0,989601	1,384329	*	*
572	32,4	1,031712	1,710054	1,094878	1,547192	1,094878	1,547192	*	*
616	34,9	1,136988	1,872916	1,179099	1,710054	1,179099	1,710054	*	*

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.12 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço B na idade de 56 dias

Traço: B									
Idade: 56 dias									
Resistência à Compressão Média: 67,9 MPa									
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,040716	0,021055	0,020356	0,021055	0,040716	0,021055	0,040716
20	1,1	0,042111	0,101789	0,042111	0,061073	0,042111	0,081431	0,063166	0,081431
30	1,7	0,063166	0,122147	0,063166	0,081431	0,063166	0,061073	0,084221	0,061073
40	2,3	*	*	0,084221	0,122147	0,084221	0,101789	0,105277	0,101789
52	2,9	0,084221	0,142505	0,105277	0,162862	0,105277	*	*	*
104	5,9	0,168443	0,223936	0,210553	0,223936	0,210553	0,189498	0,189498	0,183220
156	8,8	0,252664	0,366440	0,294775	0,325725	0,294775	0,252664	0,252664	0,285009
208	11,8	0,336885	0,488587	0,442162	0,427514	0,442162	0,336885	0,336885	0,407156
260	14,7	0,421107	0,631091	0,610605	0,529302	0,610605	0,421107	0,421107	0,508945
312	17,7	0,631660	0,753238	0,757992	0,651449	0,757992	0,505328	0,505328	0,610734
364	20,6	0,779048	0,875385	0,884324	0,793954	0,884324	0,589550	0,589550	0,732880
416	23,5	0,926435	0,977174	0,989601	0,916100	0,989601	0,779048	0,779048	0,875385
468	26,5	1,094878	1,099320	1,158044	1,038247	1,158044	0,947490	0,947490	1,017889
520	29,4	1,221210	1,201109	1,284376	1,160394	1,284376	1,094878	1,094878	1,140036
572	32,4	1,389653	1,323256	1,431763	1,323256	1,431763	1,242265	1,242265	1,241825
624	35,3	1,515985	1,425045	1,579151	1,404687	1,579151	1,389653	1,389653	1,343614

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.13 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 1 dia

Traço: C											
Idade: 1 dia											
Resistência à Compressão Média: 30,7 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,061073	0,042111	*	0,021055	0,020358	0,021055	*	0,021055	0,020358
20	1,1	0,042111	0,142505	0,063166	*	0,042111	0,040716	0,042111	*	0,042111	0,040716
27	1,5	0,063166	0,183220	0,084221	*	0,063166	0,040716	0,063166	*	0,063166	0,040716
40	2,3	*	*	0,105277	*	0,084221	0,01073	0,084221	*	0,084221	0,01073
54	3,1	0,084221	0,203578	0,147387	*	0,105277	0,162862	0,105277	*	0,105277	0,162862
81	4,6	0,126332	0,264651	0,252664	*	0,168443	0,162862	0,168443	*	0,168443	0,162862
108	6,1	0,189498	0,346082	0,273719	*	0,231609	0,183220	0,231609	*	0,231609	0,183220
135	7,6	0,210553	0,468229	0,294775	*	0,294775	0,285009	0,294775	*	0,294775	0,285009
162	9,2	0,252664	0,590376	0,357941	*	0,378996	0,366440	0,378996	*	0,378996	0,366440
189	10,7	0,336885	0,631091	0,400051	*	0,463218	0,427514	0,463218	*	0,463218	0,427514
216	12,2	0,357941	0,712523	0,484273	*	0,526384	0,488587	0,526384	*	0,526384	0,488587
243	13,8	0,378996	0,753238	0,547439	*	0,589550	0,570018	0,589550	*	0,589550	0,570018
270	15,3	0,421107	0,916100	0,610605	*	0,673771	0,651449	0,673771	*	0,673771	0,651449
297	16,8	0,442162	0,956816	0,673771	*	0,757992	0,671807	0,757992	*	0,757992	0,671807
324	18,3	0,505328	1,038247	0,736937	*	0,842214	0,773596	0,842214	*	0,842214	0,773596
351	19,9	0,547439	1,140036	0,821158	*	0,926435	0,753238	0,926435	*	0,926435	0,753238
378	21,4	0,568494	1,221467	0,905380	*	1,010656	0,855027	1,010656	*	1,010656	0,855027
405	22,9	0,610605	1,323256	0,989601	*	1,115933	0,855027	1,115933	*	1,115933	0,855027
432	24,4	0,652716	1,587907	1,073822	*	1,200154	0,916100	1,200154	*	1,200154	0,916100

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.14 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 3 dias

Traço: C		Resistência à Compressão Média: 51,2 MPa								
Idade: 3 dias		CP 1			CP 2			CP 3		
Carga (P)	Tensão (σ)	Deformação 1	Deformação 2	Deformação 1	Deformação 2	Deformação 1	Deformação 2	Deformação 1	Deformação 2	
(kN)	(MPa)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0,5	0,021055	0,061073	0,042111	0,040716	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	
20	1,1	0,042111	0,101789	0,063166	0,040716	0,021055	0,061073	0,021055	0,061073	
30	1,7	*	*	0,063166	0,101789	0,042111	0,081431	0,042111	0,081431	
40	2,3	0,084221	0,081431	0,105277	0,101789	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	
45	2,5	*	*	0,105277	0,142505	0,063166	0,101789	0,063166	0,101789	
90	5,1	0,147387	0,183220	0,189498	0,183220	0,147387	0,162862	0,147387	0,162862	
135	7,6	0,231609	0,285009	0,315830	0,183220	0,231609	0,264651	0,231609	0,264651	
180	10,2	0,294775	0,366440	0,421107	0,285009	0,336885	0,407156	0,336885	0,407156	
225	12,7	0,378996	0,508945	0,505328	0,468229	0,442162	0,508945	0,442162	0,508945	
270	15,3	0,442162	0,732880	0,610605	0,508945	0,526384	0,631091	0,526384	0,631091	
315	17,8	0,526384	0,712523	0,715882	0,631091	0,610605	0,671807	0,610605	0,671807	
360	20,4	0,589550	0,855027	0,821158	0,671807	0,715882	0,793954	0,715882	0,793954	
405	22,9	0,673771	0,916100	0,905380	0,753238	0,842214	0,875385	0,842214	0,875385	
450	25,5	0,968546	1,404687	1,010656	0,793954	0,947490	0,977174	0,947490	0,977174	
495	28,0	*	*	1,158044	0,834669	1,073822	1,119678	1,073822	1,119678	
540	30,6	1,136988	1,262183	1,284376	0,834669	1,179099	1,180752	1,179099	1,180752	
585	33,1	1,284376	1,445403	1,410708	0,895743	1,305431	1,221467	1,305431	1,221467	
630	35,7	1,389653	1,628623	1,537040	0,936458	1,431763	1,302898	1,431763	1,302898	

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.15 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 7 dias

Traço: C											
Idade: 7 dias											
Resistência à Compressão Média: 57,7 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,040716	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	0,021055	0,040716
20	1,1	0,042111	0,061073	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,042111	0,081431
30	1,7	0,063166	0,061073	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	0,063166	0,101789
40	2,3	*	*	0,084221	0,081431	0,084221	0,081431	*	*	*	*
51	2,9	0,084221	0,101789	0,105277	0,101789	0,105277	0,101789	0,105277	0,101789	0,105277	0,183220
102	5,8	0,147387	0,162862	0,189498	0,203578	0,189498	0,203578	0,189498	0,203578	0,189498	0,244293
153	8,7	0,231609	0,264651	0,252664	0,305367	0,252664	0,305367	0,252664	0,305367	0,252664	0,325725
204	11,5	0,294775	0,386798	0,357941	0,447871	0,357941	0,447871	0,336885	0,407156	0,336885	0,407156
255	14,4	0,378996	0,488587	0,631660	0,529302	0,631660	0,529302	0,421107	0,488587	0,421107	0,488587
306	17,3	0,463218	0,610734	0,757992	0,631091	0,757992	0,631091	0,505328	0,590376	0,505328	0,590376
357	20,2	0,547439	0,712523	0,905380	0,773596	0,905380	0,773596	0,589550	0,712523	0,589550	0,712523
408	23,1	0,652716	0,875385	1,073822	0,834669	1,073822	0,834669	0,947490	0,875385	0,947490	0,875385
459	26,0	0,715882	0,956816	1,242265	0,936458	1,242265	0,936458	1,031712	0,956816	1,031712	0,956816
510	28,9	1,094878	1,078963	1,410708	1,058605	1,410708	1,058605	1,221210	1,058605	1,221210	1,058605
561	31,7	1,284376	1,180752	1,579151	1,180752	1,579151	1,180752	1,368597	1,180752	1,368597	1,180752
612	34,6	1,431763	1,302898	1,768649	1,282541	1,768649	1,282541	1,515985	1,302898	1,515985	1,302898
663	37,5	1,621261	1,425045	1,958147	1,404687	1,958147	1,404687	1,684427	1,425045	1,684427	1,425045
714	40,4	1,747593	1,506476	2,126589	1,526834	2,126589	1,526834	1,789704	1,526834	1,789704	1,547192

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.16 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 14 dias

Traço: C									
Idade: 14 dias									
Resistência à Compressão Média: 56,3 MPa									
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	0,021055	0,047016
20	1,1	0,042111	0,061073	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,021055	0,081431
30	1,7	*	*	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	0,042111	0,081431
40	2,3	0,063166	0,081431	0,084221	0,081431	0,084221	0,081431	0,042111	0,101789
50	2,8	*	*	0,084221	*	0,084221	0,101789	*	*
100	5,7	0,105277	0,142505	0,126332	0,223936	0,126332	0,223936	0,126332	0,162862
150	8,5	0,168443	0,244293	0,210553	0,346082	0,210553	0,346082	0,189498	0,223936
200	11,3	0,231609	0,346082	0,273719	0,447871	0,273719	0,447871	0,252664	0,305367
250	14,1	0,315830	0,447871	0,357941	0,549660	0,357941	0,549660	0,336885	0,407156
300	17,0	0,378996	0,570018	0,421107	0,651449	0,421107	0,651449	0,400051	0,468229
350	19,8	0,442162	0,692165	0,484273	0,753238	0,484273	0,753238	0,484273	0,570018
400	22,6	0,505328	0,814311	0,736937	0,855027	0,736937	0,855027	0,589550	0,692165
450	25,5	0,568494	0,936458	0,821158	0,936458	0,821158	0,936458	0,673771	0,773596
500	28,3	0,652716	1,058605	1,010656	1,058605	1,010656	1,058605	0,757992	0,834669
550	31,1	0,715882	1,180752	1,115933	1,180752	1,115933	1,180752	0,863269	0,936458
600	34,0	0,779048	1,302898	1,284376	1,302898	1,284376	1,302898	0,968546	1,099320

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.17 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 28 dias

Traço: C											
Idade: 28 dias											
Resistência à Compressão Média: 58,1 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,02358	0,021055	0,040716	0,021055	0,040716	0,021055	0,040716	0,021055	0,020358
20	1,1	0,042111	0,081431	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,040716
30	1,7	*	*	0,063166	0,061073	0,063166	0,061073	0,063166	0,061073	0,063166	0,061073
40	2,3	0,063166	0,122147	0,084221	0,081431	0,084221	0,081431	0,084221	0,081431	0,084221	0,081431
52	2,9	0,084221	0,162862	0,105277	0,081431	0,105277	0,081431	0,084221	0,081431	0,084221	0,122147
104	5,9	0,147387	0,203578	0,189498	0,142505	0,189498	0,142505	0,168443	0,142505	0,168443	0,264651
156	8,8	0,231609	0,305367	0,273719	0,223936	0,273719	0,223936	0,252664	0,223936	0,252664	0,305367
208	11,8	0,315830	0,346082	0,378996	0,305367	0,378996	0,305367	0,336885	0,305367	0,336885	0,346082
260	14,7	0,400051	0,468229	0,484273	0,386798	0,484273	0,386798	0,421107	0,386798	0,421107	0,447871
312	17,7	0,505328	0,549660	0,631660	0,529302	0,631660	0,529302	0,526384	0,529302	0,526384	0,529302
364	20,6	0,589550	0,671807	0,694826	0,590376	0,694826	0,590376	0,589550	0,590376	0,589550	0,651449
416	23,5	0,673771	0,732880	0,800103	0,712523	0,800103	0,712523	0,715882	0,712523	0,715882	0,773596
468	26,5	0,800103	0,875385	0,905380	0,814311	0,905380	0,814311	0,800103	0,814311	0,800103	0,875385
520	29,4	0,884324	0,977174	1,010656	0,936458	1,010656	0,936458	0,905380	0,936458	0,905380	0,997532
572	32,4	0,989601	1,078963	1,136988	1,058605	1,136988	1,058605	1,010656	1,058605	1,010656	1,119678
624	35,3	1,073822	1,160394	1,242265	1,140036	1,242265	1,140036	1,115933	1,140036	1,115933	1,241825
676	38,3	1,158044	1,241825	1,326486	1,180752	1,326486	1,180752	1,200154	1,180752	1,200154	1,343614
728	41,2	1,284376	1,323256	1,494929	1,302898	1,494929	1,302898	1,305431	1,302898	1,305431	1,445403

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.18 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço C na idade de 56 dias

Traço: C											
Idade: 56 dias											
Resistência à Compressão Média: 67,9 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,042111	0,040716	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358	0,021055	0,040716
20	1,1	*	*	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,0421055	0,040716	0,0421055	0,081431
30	1,7	0,063166	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,061073	0,042111	0,142505
40	2,3	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	*	0,081431	*	*
60	3,4	0,105277	0,122147	0,105277	0,122147	0,105277	0,122147	0,105277	0,122147	0,084221	0,142505
120	6,8	0,168443	0,264651	0,189498	0,305367	0,189498	0,305367	0,189498	0,305367	0,189498	0,264651
180	10,2	0,231609	0,407156	0,294775	0,366440	0,294775	0,366440	0,273719	0,366440	0,273719	0,346082
240	13,6	0,315830	0,447871	0,378996	0,508945	0,378996	0,508945	0,378996	0,508945	0,378996	0,488587
300	17,0	0,400051	0,508945	0,484273	0,610734	0,484273	0,610734	0,442162	0,610734	0,442162	0,570018
360	20,4	0,484273	0,590376	0,589550	0,753238	0,589550	0,753238	0,547439	0,753238	0,547439	0,631091
420	23,8	0,589550	0,671807	0,694826	0,895743	0,694826	0,895743	0,631660	0,895743	0,631660	0,753238
480	27,2	0,694826	0,732880	0,779048	1,058605	0,779048	1,058605	0,715882	1,058605	0,715882	0,916100
540	30,6	0,821158	0,814311	0,800103	1,201109	0,800103	1,201109	0,821158	1,201109	0,821158	0,956816
600	34,0	0,947490	0,895743	0,884324	1,384329	0,884324	1,384329	0,926435	1,384329	0,926435	1,038247
660	37,3	1,073822	0,956816	0,989601	1,567550	0,989601	1,567550	1,052767	1,567550	1,052767	1,221467
720	40,7	1,200154	1,017889	1,031712	1,750770	1,031712	1,750770	1,179099	1,750770	1,179099	1,282541

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.19 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 1 dia

Traço: D											
Idade: 1 dia											
Resistência à Compressão Média: 33,1 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0	0,061073	0,021055	0,081431	0,021055	0,081431	0,021055	0,081431	0,021055	0,020358
20	1,1	0,021055	0,081431	0,042111	0,101789	0,042111	0,101789	0,042111	0,101789	0,042111	0,040716
29	1,6	0,042111	0,101789	*	*	*	*	0,063166	*	0,063166	0,061073
40	2,3	0,042111	0,183220	0,063166	0,122147	0,063166	0,122147	0,063166	0,122147	0,063166	0,081431
58	3,3	0,084221	0,162862	0,084221	0,162862	0,084221	0,162862	0,084221	0,162862	0,084221	0,142505
87	4,9	0,147387	0,203578	0,147387	0,223936	0,147387	0,223936	0,126332	0,189498	0,126332	0,183220
116	6,6	0,210553	0,264651	0,189498	0,264651	0,189498	0,264651	0,189498	0,264651	0,189498	0,264651
145	8,2	0,273719	0,325725	0,231609	0,366440	0,231609	0,366440	0,231609	0,325725	0,231609	0,325725
174	9,8	0,336885	0,407156	0,273719	0,508945	0,273719	0,508945	0,273719	0,427514	0,273719	0,427514
203	11,5	0,400051	0,468229	0,315830	0,610734	0,315830	0,610734	0,315830	0,468229	0,315830	0,468229
232	13,1	0,463218	0,549660	0,378996	0,692165	0,378996	0,692165	0,378996	0,549660	0,378996	0,549660
261	14,8	0,526384	0,651449	0,442162	0,814311	0,442162	0,814311	0,421107	0,631091	0,421107	0,631091
290	16,4	0,589550	0,753238	0,484273	0,936458	0,484273	0,936458	0,463218	0,712523	0,463218	0,712523
319	18,1	0,652716	0,855027	0,547439	1,058605	0,547439	1,058605	0,505328	0,793954	0,505328	0,793954
348	19,7	0,757992	1,160394	0,589550	1,201109	0,589550	1,201109	0,547439	0,875385	0,547439	0,875385
377	21,3	0,842214	1,302898	0,631660	1,363972	0,631660	1,363972	0,568494	0,997532	0,568494	0,997532
406	23,0	0,926435	1,465761	0,652716	1,506476	0,652716	1,506476	0,610605	1,119678	0,610605	1,119678
435	24,6	1,031712	1,587907	0,884324	1,648981	0,884324	1,648981	0,610605	1,201109	0,610605	1,201109
464	26,3	1,136988	1,750770	0,947490	1,832201	0,947490	1,832201	0,631660	1,302898	0,631660	1,302898

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.20 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 3 dias

Traço: D											
Idade: 3 dias											
Resistência à Compressão Média: 47,9 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)
		Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)				
0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	*	0
9	0,5	0,021055	0,020358	0,021055	0,040716	0,021055	0,040716	*	0,040716	*	0,040716
20	1,1	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	*	0,040716	*	*
30	1,7	0,063166	0,061073	0,063166	*	*	*	*	*	*	*
42	2,4	0,084221	0,101789	0,084221	0,040716	0,084221	0,040716	*	0,061073	*	0,061073
84	4,8	0,147387	0,142505	0,147387	0,101789	0,126332	0,101789	*	0,122147	*	0,122147
126	7,1	0,210553	0,244293	0,210553	0,162862	0,189498	0,162862	*	0,142505	*	0,142505
168	9,5	0,294775	0,346082	0,294775	0,264651	0,273719	0,264651	*	0,244293	*	0,244293
210	11,9	0,357941	0,447871	0,357941	0,346082	0,336885	0,346082	*	0,346082	*	0,346082
252	14,3	0,421107	0,549660	0,421107	0,427514	0,378996	0,427514	*	0,447871	*	0,447871
294	16,6	0,484273	0,671807	0,484273	0,549660	0,463218	0,549660	*	0,549660	*	0,549660
336	19,0	0,568494	0,753238	0,568494	0,651449	0,526384	0,651449	*	0,651449	*	0,651449
378	21,4	0,652716	0,855027	0,652716	0,732880	0,589550	0,732880	*	0,712523	*	0,712523
420	23,8	0,736937	0,936458	0,736937	0,855027	0,652716	0,855027	*	0,814311	*	0,814311
462	26,1	0,821158	0,997532	0,821158	0,997532	0,715882	0,997532	*	0,936458	*	0,936458
504	28,5	0,926435	1,099320	0,926435	1,058605	0,779048	1,058605	*	1,058605	*	1,058605
546	30,9	1,031712	1,201109	1,031712	1,160394	0,863269	1,160394	*	1,119678	*	1,119678
588	33,3	1,136988	1,302898	1,136988	1,262183	0,926435	1,262183	*	1,221467	*	1,221467
630	35,7	1,242265	1,384329	1,242265	1,363972	0,989601	1,363972	*	1,323256	*	1,323256
672	38,0	1,347542	1,526834	1,347542	1,486118	1,052767	1,486118	*	1,425045	*	1,425045

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.21 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 7 dias

Traço: D										
Idade: 7 dias										
Resistência à Compressão Média: 60,2 MPa										
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3				
		Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)	Deformação 1 (x 10 ⁻³)	Deformação 2 (x 10 ⁻³)			
0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0
9	0,5	0	0,020358	0,042111	*	0,042111	0,020358	0,042111	0,020358	0,020358
20	1,1	0,021055	0,061073	0,063166	*	0,063166	0,040716	0,063166	0,040716	0,040716
30	1,7	0,042111	0,081431	0,084221	*	0,084221	*	*	*	*
40	2,3	*	*	0,105277	*	0,105277	0,061073	0,105277	0,061073	0,061073
53	3,0	0,063166	0,101789	0,126332	*	0,126332	*	*	*	*
106	6,0	0,147387	0,183220	0,231609	*	0,231609	0,162862	0,189498	0,162862	0,162862
159	9,0	0,210553	0,244293	0,315830	*	0,315830	0,264651	0,294775	0,264651	0,264651
212	12,0	0,315830	0,325725	0,421107	*	0,421107	0,407156	0,378996	0,407156	0,407156
265	15,0	0,378996	0,447871	0,526384	*	0,526384	0,508945	0,463218	0,508945	0,508945
318	18,0	0,463218	0,610734	0,610605	*	0,610605	0,610734	0,547439	0,610734	0,610734
371	21,0	0,547439	0,692165	0,715882	*	0,715882	0,671807	0,631660	0,671807	0,671807
424	24,0	0,631660	0,793954	0,800103	*	0,800103	0,773596	0,715882	0,773596	0,773596
477	27,0	0,736937	0,895743	0,905380	*	0,905380	0,895743	0,779048	0,895743	0,895743
530	30,0	0,842214	0,956816	1,010656	*	1,010656	0,997532	0,842214	0,997532	0,997532
583	33,0	0,947490	1,038247	1,094878	*	1,094878	1,078963	0,905380	1,078963	1,078963
636	36,0	1,031712	1,140036	1,136988	*	1,136988	1,160394	1,052767	1,160394	1,160394
689	39,0	1,158044	1,140036	1,158044	*	1,158044	1,302898	1,221210	1,302898	1,302898

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.22 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 14 dias

Traço: D									
Idade: 14 dias									
Resistência à Compressão Média: 59,2 MPa									
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,5	0,021055	0,020358	0,021055	0,061073	0,021055	0,020358	0,021055	0,020358
20	1,1	0	0,061073	0,021055	0,081431	0,021055	0,040716	0,042111	0,040716
30	1,7	0,042111	0,101789	0,042111	0,122147	0,042111	*	*	*
40	2,3	0,063166	0,101789	0,042111	0,142505	0,063166	0,061073	0,063166	0,061073
52	2,9	0,063166	0,142505	0,063166	0,183220	0,063166	0,081431	0,084221	0,081431
104	5,9	0,126332	0,203578	0,105277	0,366440	0,105277	0,142505	0,147387	0,142505
156	8,8	0,168443	0,264651	0,168443	0,447871	0,168443	0,264651	0,210553	0,264651
208	11,8	0,231609	0,366440	0,231609	0,570018	0,231609	0,325725	0,294775	0,325725
260	14,7	0,315830	0,447871	0,294775	0,671807	0,294775	0,407156	0,378996	0,407156
312	17,7	0,378996	0,570018	0,378996	0,753238	0,378996	0,488587	0,715882	0,488587
364	20,6	0,421107	0,651449	0,442162	0,875385	0,442162	0,590376	0,800103	0,590376
416	23,5	0,484273	0,814311	0,505328	0,956816	0,505328	0,651449	0,968546	0,651449
468	26,5	0,568494	0,875385	0,589550	1,058605	0,589550	0,793954	1,073822	0,793954
520	29,4	0,631660	0,956816	0,652716	1,180752	0,652716	0,875385	1,200154	0,875385
572	32,4	0,673771	1,078963	0,757992	1,282541	0,757992	0,997532	1,326486	0,997532
624	35,3	0,736937	1,221467	*	*	*	1,078963	1,494929	1,078963
676	38,3	0,800103	1,323256	*	*	*	1,180752	1,642317	1,180752
728	41,2	0,884324	1,384329	*	*	*	1,282541	corrigeir	1,282541

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.23 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 28 dias

Traço: D											
Idade: 28 dias											
Resistência à Compressão Média: 58,9 MPa											
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3					
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,021055	0,020358	0,021055	0,040716	0,021055	0,040716	0	0	0	0,020358
20	1,1	0,042111	0,040716	0,042111	0,081431	0,042111	0,081431	0,021055	0,061073	0,021055	0,061073
30	1,7	0,042111	0,061073	*	*	*	*	0,042111	0,081431	0,042111	0,081431
40	2,3	0,063166	0,101789	*	*	*	*	0,084221	0,101789	0,084221	0,101789
52	2,9	0,105277	0,142505	0,084221	0,061073	0,084221	0,061073	0,105277	0,142505	0,105277	0,142505
104	5,9	0,189498	0,183220	0,126332	0,142505	0,126332	0,142505	0,168443	0,244293	0,168443	0,244293
156	8,8	0,273719	0,285009	0,210553	0,203578	0,210553	0,203578	0,252664	0,346082	0,252664	0,346082
208	11,8	0,357941	0,366440	0,294775	0,325725	0,294775	0,325725	0,315830	0,468229	0,315830	0,468229
260	14,7	0,442162	0,468229	0,357941	0,427514	0,357941	0,427514	0,421107	0,570018	0,421107	0,570018
312	17,7	0,505328	0,570018	0,442162	0,529302	0,442162	0,529302	0,526384	0,671807	0,526384	0,671807
364	20,6	0,589550	0,671807	0,505328	0,631091	0,505328	0,631091	0,610605	0,732880	0,610605	0,732880
416	23,5	0,673771	0,753238	0,589550	0,753238	0,589550	0,753238	0,694826	0,814311	0,694826	0,814311
468	26,5	0,779048	0,875385	0,652716	0,875385	0,652716	0,875385	0,800103	0,916100	0,800103	0,916100
520	29,4	0,884324	0,956816	0,736937	0,997532	0,736937	0,997532	0,884324	0,997532	0,884324	0,997532
572	32,4	0,989601	1,058605	0,821158	1,140036	0,821158	1,140036	0,989601	1,119678	0,989601	1,119678
624	35,3	1,073822	1,140036	0,884324	1,241825	0,884324	1,241825	1,115933	1,201109	1,115933	1,201109
676	38,3	1,179099	1,241825	0,947490	1,343614	0,947490	1,343614	1,126332	1,302898	1,126332	1,302898
728	41,2	1,263320	1,302898	1,031712	1,465761	1,031712	1,465761	1,410708	1,404687	1,410708	1,404687

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Tabela A.24 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade referentes ao traço D na idade de 56 dias

Traço: D										
Idade: 56 dias										
Resistência à Compressão Média: 58,7 MPa										
Carga (P) (kN)	Tensão (σ) (MPa)	CP 1		CP 2		CP 3				
		Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 1 ($\times 10^{-3}$)	Deformação 2 ($\times 10^{-3}$)			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,5	0,042111	0,040716	0,021055	0,040716	0,021055	0,040716	0,021055	0,020358	0,020358
20	1,1	0,042111	0,061073	0,042111	0,040716	0,042111	0,040716	0,042111	0,061073	0,061073
30	1,7	0,063166	0,081431	*	*	0,063166	*	0,063166	0,061073	0,061073
40	2,3	0,084221	0,101789	0,063166	0,081431	0,063166	0,081431	0,084221	0,081431	0,081431
52	2,9	0,105277	0,122147	*	*	*	*	0,105277	0,122147	0,122147
104	5,9	0,189498	0,183220	0,168443	0,101789	0,168443	0,101789	0,189498	0,264651	0,264651
156	8,8	0,294775	0,244293	0,252664	0,162862	0,252664	0,162862	0,315830	0,264651	0,264651
208	11,8	0,400051	0,305367	0,357941	0,244293	0,357941	0,244293	0,400051	0,325725	0,325725
260	14,7	0,484273	0,366440	0,442162	0,325725	0,442162	0,325725	0,505328	0,366440	0,366440
312	17,7	0,547439	0,447871	0,547439	0,386798	0,547439	0,386798	0,589550	0,447871	0,447871
364	20,6	0,652716	0,508945	0,652716	0,468229	0,652716	0,468229	0,694826	0,488587	0,488587
416	23,5	0,736937	0,570018	0,715882	0,590376	0,715882	0,590376	0,800103	0,570018	0,570018
468	26,5	0,863269	0,651449	0,800103	0,631091	0,800103	0,631091	0,905380	0,651449	0,651449
520	29,4	0,968546	0,712523	0,884324	0,671807	0,884324	0,671807	1,010656	0,732880	0,732880
572	32,4	1,073822	0,793954	0,989601	0,997532	0,989601	0,997532	1,052767	0,793954	0,793954
624	35,3	1,200154	0,875385	1,115933	1,038247	1,115933	1,038247	1,158044	0,855027	0,855027
676	38,3	1,326486	0,956816	*	*	*	*	*	*	*

* Resultados eliminados devido ao mal funcionamento do transdutor

Apêndice B

Método dos Mínimos Quadrados

B.1 Introdução

O objetivo deste apêndice é apresentar, de uma maneira simples e sucinta, a teoria e a formulação utilizadas na análise estatística dos resultados do presente trabalho. Será apresentado o método dos mínimos quadrados dentro do contexto da sua mais simples aplicação: o ajustamento da “melhor” linha reta a um determinado conjunto de observações $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ de forma a relacionar as variáveis X e Y .

B.2 Relações Entre Variáveis

Com muita frequência, na prática, verifica-se que existe uma relação entre duas ou mais variáveis. Por exemplo: os pesos dos adultos do sexo masculino dependem, em certo grau, de suas alturas; as circunferências de círculos dependem de seus raios; e a pressão de uma determinada massa de gás depende de sua temperatura e de seu volume. Geralmente, essa relação é um tanto complexa para se descrever. Procura-se, nestes casos, expressar tal relação através de uma função matemática mais simples, estabelecendo uma equação que ligue as variáveis em estudo.

Para auxiliar a determinação de uma equação que relacione as variáveis, um primeiro passo consiste em colecionar dados que indiquem os valores correspondentes das variáveis consideradas. Uma segunda etapa consiste em plotar os valores coletados em um sistema de coordenadas. O conjunto de pontos resultante é denominado *diagrama de dispersão*. No diagrama de dispersão é possível, frequentemente, visualizar uma curva que se aproxime dos dados. Essa curva é denominada de *curva de ajustamento*. O problema geral da determinação das equações de curvas que acomodem a certos conjuntos de dados é denominado *ajustamento de curvas*.

B.3 Regressão Linear-Ajustamento de uma Linha Reta pelo Método dos Mínimos Quadrados

O modelo mais simples de curva de ajustamento é a linha reta, cuja expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$Y = A + B X + \varepsilon \quad (\text{B.1})$$

Ou seja, para um determinado valor de X , o correspondente valor de Y consiste do valor $A + B X$ acrescentado do valor ε , que é o *desvio* pelo qual qualquer valor de Y pode “cair fora” da linha reta. A e B são denominados os *parâmetros* do modelo. Os valores de A , B e ε são desconhecidos porém, o conjunto de dados pode ser utilizado para fornecer estimativas a e b para os valores de A e B , respectivamente; já o valor de ε seria difícil de se determinar uma vez que ele varia para cada valor de Y . Poder-se-ia escrever, então, a seguinte expressão:

$$\hat{Y} = a + b X \quad (\text{B.2})$$

onde \hat{Y} denota o valor estimado de Y para um determinado valor de X , quando a e b são determinados. O processo aqui apresentado para se determinar os valores das estimativas a e b será o *método dos mínimos quadrados*.

Seja dado um conjunto de n pares de observações (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , ..., (X_n, Y_n) . Então, pela equação (B.1), pode-se escrever:

$$Y_i = A + B X_i + \varepsilon_i \quad (\text{B.3})$$

para $i=1, 2, \dots, n$, de modo que a soma dos quadrados dos desvios em relação à linha reta é:

$$S = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - A - B X_i)^2 \quad (\text{B.4})$$

De todas as curvas que se ajustam a um conjunto de pontos, a que tem a propriedade de apresentar o mínimo valor de S é denominada *melhor curva de ajustamento*. Diz-se que uma curva, que apresenta essa propriedade, ajusta os dados no sentido dos mínimos quadrados e é denominada *curva de mínimos quadrados*. Em consequência, uma reta que apresenta essa propriedade é denominada *reta de mínimo quadrado*.

Desta forma, as estimativas a e b devem ser determinadas de modo que, ao substituírem os valores de A e B , produzem o menor valor possível de S . Diferenciando a equação (B.4) primeiramente, em relação a A e depois em relação a B tem-se:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = -2 \sum_{i=1}^n (Y_i - A - B X_i) \quad (\text{B.5a})$$

$$\frac{\partial S}{\partial B} = -2 \sum_{i=1}^n X_i (Y_i - A - B X_i) \quad (\text{B.5b})$$

Substituindo-se os valores de A e B nas expressões (B.5) por suas respectivas estimativas a e b e igualando-se os resultados a zero, obtem-se as expressões:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - a - b X_i) = 0 \quad (\text{B.6a})$$

$$\sum_{i=1}^n X_i (Y_i - a - b X_i) = 0 \quad (\text{B.6b})$$

O desenvolvimento das expressões (B.6) conduz às seguintes equações, denominadas *equações normais da reta de mínimo quadrado*:

$$\sum_{i=1}^n Y_i = a n + b \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{B.7a})$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (\text{B.7b})$$

Resolvendo-se o sistema de equações representado por (B.7), a estimativa b , denominada o *coeficiente angular ou declividade ou inclinação da reta*, é:

$$b = \frac{\sum X_i Y_i - [(\sum X_i)(\sum Y_i)]/n}{\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2/n} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{B.8})$$

onde todos os somatórios são de $i=1$ a n e onde são definidas as *médias globais*:

$$\bar{X} = (X_1 + X_2 + \dots + X_n)/n = (\sum X_i)/n \quad (\text{B.9a})$$

$$\bar{Y} = (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)/n = (\sum Y_i)/n \quad (\text{B.9b})$$

A quantidade $\sum X_i^2$ é denominada a *soma dos quadrados dos X's não corrigida* e $(\sum X_i)^2/n$ é a *correção para a média dos X's*. A diferença é denominada *soma dos quadrados dos X's corrigida*. Similarmente, $\sum X_i Y_i$ é denominada a *soma dos produtos não corrigida* e $(\sum X_i)(\sum Y_i)/n$ é a *correção para as médias*. A diferença é denominada *soma dos produtos de X e Y corrigida*.

A solução da equação (B.7) para a estimativa a , denominada *ordenada à origem ou intercepção no eixo dos Y* é:

$$a = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (\text{B.10})$$

Substituindo a equação (B.10) na equação (B.2), obtem-se a estimativa da equação da linha reta da regressão:

$$\hat{Y} = \bar{Y} + b (X - \bar{X}) \quad (\text{B.11})$$

onde b é dado pela equação (B.8).

É importante notar que, se $X = \bar{X}$, então $\hat{Y} = \bar{Y}$. Isto significa que o ponto (\bar{X}, \bar{Y}) está sobre a linha reta da regressão.

B.4 A Precisão da Estimativa da Equação da Reta da Regressão

No item anterior, considerou-se o problema da estimativa da equação da reta da regressão de uma variável a partir de uma outra variável correlata. Neste item, considerar-se-á o problema da *correlação*, ou do grau de relação entre as variáveis, que procura determinar quão bem uma equação linear descreve ou explica a relação entre as duas variáveis.

Se X e Y representam as duas variáveis consideradas, um diagrama de dispersão mostra a localização dos pontos (X, Y) em um sistema de coordenadas. Se todos os pontos desse diagrama parecem cair nas proximidades de uma reta, a correlação é denominada *linear*. Nesse caso, uma equação linear é apropriada aos fins de regressão.

Se Y tende a aumentar quando X cresce, a correlação é denominada *positiva ou direta*. Se Y tende a diminuir quando X aumenta, a correlação é denominada *negativa ou inversa*.

Pode-se avaliar, de modo *qualitativo*, quão bem uma certa reta representa a relação entre as variáveis mediante a observação direta do próprio diagrama de dispersão. Ao tratar de modo *quantitativo* o problema da dispersão dos dados amostrais em relação a retas será necessário estabelecer *medidas de correlação*. Considere-se a seguinte identidade:

$$Y_i - \hat{Y}_i = (Y_i - \bar{Y}) - (\hat{Y}_i - \bar{Y}) \quad (\text{B.12})$$

O resíduo $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ é a diferença entre duas quantidades: (i) o desvio do valor observado Y_i em relação à média global \bar{Y} e (ii) o desvio do valor estimado \hat{Y}_i em relação à média global \bar{Y} .

Pode-se reescrever a identidade (B.12) da seguinte maneira:

$$(Y_i - \bar{Y}) = (\hat{Y}_i - \bar{Y}) + (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (\text{B.13})$$

Se se elevar ao quadrado ambos os lados da equação (B.13) e se aplicar o somatório de $i=1, 2, \dots, n$, obtém-se:

$$\sum (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + 2\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})(Y_i - \hat{Y}_i) + \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{B.14})$$

Pode-se demonstrar que o segundo termo do lado direito da expressão (B.14) se anula. Desta forma, essa expressão fica reduzida para:

$$\sum (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{B.15})$$

O lado esquerdo da expressão (B.15), $\sum (Y_i - \bar{Y})^2$, é a soma dos quadrados dos desvios dos valores observados em relação à média global e é definido como a *variação total* de Y . O primeiro termo do lado da direita da expressão (B.15), é denominado *variação explicada*, enquanto o segundo é a *variação não explicada*, assim denominadas porque os desvios $\hat{Y}_i - \bar{Y}$ têm um padrão definido, enquanto que os desvios $Y_i - \hat{Y}_i$ comportam-se de maneira casual ou imprevisível.

O quociente da variação explicada para a total é denominado *coeficiente de determinação* R^2 . Se a variação explicada for nula, isto é, se a variação total for toda não explicada, esse quociente será igual a zero. Se a variação não explicada for nula, isto é, se a variação total for toda explicada, esse quociente

será igual a um. Nos outros casos, o quociente terá valor compreendido entre zero e um. Portanto, o coeficiente de determinação é definido pela expressão:

$$R^2 = \frac{\text{variação explicada}}{\text{variação total}} = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{B.16})$$

A quantidade R é denominada *coeficiente de correlação* e varia entre -1 e +1. Os sinais \pm são usados para a correlação linear positiva e para a negativa, respectivamente.

O valor de R calculado mede o grau de relação correspondente ao tipo de equação que é realmente admitida. Portanto, se for adotada uma equação linear, e se a expressão (B.16) conduzir a um valor de R próximo de zero, isso significa que quase não há correlação linear entre as variáveis. Em outras palavras, o coeficiente de correlação mede a excelência do ajustamento aos dados da equação considerada.

Toda soma de quadrados tem associado a ela um número chamado de seus *graus de liberdade*. Esse número indica quantas partes independentes de informações envolvendo os n valores independentes Y_1, Y_2, \dots, Y_n são necessárias para computar a soma dos quadrados. Assim sendo, a variação total apresenta (n - 1) graus de liberdade enquanto as variações explicadas e não explicadas apresentam, respectivamente, 1 e (n - 2) graus de liberdade. Conseqüentemente, uma expressão correspondente à equação (B.15), envolvendo os graus de liberdade poderia ser escrita da seguinte maneira:

$$n - 1 = 1 + (n - 2) \quad (\text{B.17})$$

Define-se a expressão *média dos quadrados* como sendo o quociente entre uma determinada soma de quadrados e os seus graus de liberdade correspondente. Das equações (B.15) e (B.17) pode-se construir uma *tabela de análise de variância* na forma da Tabela B.1.

Tabela B.1 - Tabela de análise de variância

Origem da Variação	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média dos Quadrados (MQ)
Varição explicada	1	$\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
Varição não explicada	n - 2	$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2}$
Varição total	n - 1	$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}$

A média dos quadrados da variação não explicada, representada por s^2 , fornece uma estimativa, baseada em $n - 2$ graus de liberdade, da *variância* ou dispersão em relação à reta da regressão de Y para X , uma quantidade representada por $\sigma_{Y.X}^2$. A quantidade s é definida como o *desvio padrão da estimativa de Y para X* .

B.5 Examinando a Equação da Reta da Regressão

Neste item, serão apresentadas as hipóteses básicas relativas às distribuições de probabilidade adotadas no modelo $Y_i = A + B X_i + \varepsilon_i$, $i=1, 2, \dots, n$:

- (1) ε_i é uma variável randômica com média zero e variância σ^2 (desconhecida), ou seja, $E(\varepsilon_i) = 0$, $V(\varepsilon_i) = \sigma^2$.
- (2) ε_i e ε_j são variáveis não correlatas para $i \neq j$ de modo que, $\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$.
Conseqüentemente, $E(Y_i) = A + B X_i$, $V(Y_i) = \sigma^2$ e Y_i e Y_j , $i \neq j$, são não correlatas.
- (3) ε_i é uma variável randômica normalmente distribuída, com média zero e variância σ^2 , de acordo com (1), ou seja, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$. Segundo esta última hipótese, ε_i e ε_j não somente são variáveis não correlatas mas, necessariamente independentes.

Deve-se comentar que σ^2 pode ser ou não igual a $\sigma_{Y.X}^2$, a variância em relação à reta da regressão de Y para X mencionada anteriormente. Se o modelo assumido for o modelo real, então $\sigma^2 = \sigma_{Y.X}^2$. Se o modelo assumido não for o modelo real, então $\sigma^2 < \sigma_{Y.X}^2$. Segue que s^2 , a média dos quadrados da variação não explicada que estima o valor de $\sigma_{Y.X}^2$, é também uma estimativa do valor de σ^2 apenas se o modelo estiver correto. Se $\sigma^2 > \sigma_{Y.X}^2$ pode-se dizer que o modelo assumido é incorreto ou carece de ajustamento.

B.6 Desvio Padrão do Coeficiente Angular b - Intervalo de Confiança para B

Demonstra-se que a *variância do coeficiente angular b* é dada pela expressão:

$$V(b) = \frac{\sigma^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{B.18})$$

O *desvio padrão de b* é definido com a raiz quadrada da variância, ou seja:

$$\text{d.p.}(b) = \frac{\sigma}{\left\{ \sum (X_i - \bar{X})^2 \right\}^{1/2}} \quad (\text{B.19})$$

Se σ é desconhecida e assumindo que o modelo é o real, pode-se usar o valor de s para se obter o *desvio padrão estimado de b* , dado por:

$$\text{d.p.}_{\text{est}}(b) = \frac{s}{\left\{ \sum (X_i - \bar{X})^2 \right\}^{1/2}} \quad (\text{B.20})$$

Assumindo-se que os desvios dos valores observados em relação à linha reta, ε_i , pertencem à mesma distribuição normal, $N(0, \sigma^2)$, demonstra-se que pode-se especificar com 100 (1 - α) % de confiança os seguintes limites para o valor de B :

$$b - \frac{t(n-2, 1-0,5\alpha) s}{\{\sum (X_i - \bar{X})^2\}^{1/2}} < B < b + \frac{t(n-2, 1-0,5\alpha) s}{\{\sum (X_i - \bar{X})^2\}^{1/2}} \quad (\text{B.21})$$

onde $t(n-2, 1-0,5\alpha)$ é o valor do percentil 100 ($1 - 0,5\alpha$) da distribuição t de Student com $(n - 2)$ graus de liberdade (o número de graus de liberdade no qual a estimativa s^2 é baseada). Esse valor pode ser obtido na Tabela B.2, apresentada no final deste apêndice.

B.7 Desvio Padrão da Intercepção a - Intervalo de Confiança para A

Demonstra-se que a *variância da intercepção a* é dada pela expressão:

$$V(a) = \frac{\sum X_i^2}{n \sum (X_i - \bar{X})^2} \sigma^2 \quad (\text{B.22})$$

O *desvio padrão de a* é definido com a raiz quadrada da variância, ou seja:

$$\text{d.p.}(a) = \left\{ \frac{\sum X_i^2}{n \sum (X_i - \bar{X})^2} \right\}^{1/2} \sigma \quad (\text{B.23})$$

Se σ é desconhecida e assumindo que o modelo é o real, pode-se usar o valor de s para se obter o *desvio padrão estimado de a*, dado por:

$$\text{d.p.est}(a) = \left\{ \frac{\sum X_i^2}{n \sum (X_i - \bar{X})^2} \right\}^{1/2} s \quad (\text{B.24})$$

Assumindo-se que os desvios dos valores observados em relação à linha reta, ε_i , pertencem à mesma distribuição normal, $N(0, \sigma^2)$, demonstra-se que pode-se especificar com $100(1 - \alpha)\%$ de confiança os seguintes limites para o valor de A:

$$a - t(n-2, 1-0,5\alpha) \left\{ \frac{\sum X_i^2}{n \sum (X_i - \bar{X})^2} \right\}^{1/2} s$$

$$< A <$$

$$a + t(n-2, 1-0,5\alpha) \left\{ \frac{\sum X_i^2}{n \sum (X_i - \bar{X})^2} \right\}^{1/2} s \quad (\text{B.25})$$

onde $t(n-2, 1-0,5\alpha)$ é o valor do percentil $100(1 - 0,5\alpha)$ da distribuição t de Student com $(n - 2)$ graus de liberdade (o número de graus de liberdade no qual a estimativa s^2 é baseada).

Tabela B.2 - Valores dos percentis da distribuição t de Student com GL graus de liberdade

GL	$t_{0,995}$	$t_{0,99}$	$t_{0,975}$	$t_{0,95}$	$t_{0,90}$	$t_{0,80}$	$t_{0,75}$	$t_{0,70}$	$t_{0,60}$	$t_{0,55}$
1	63,66	31,82	12,71	6,31	3,08	1,376	1,000	0,727	0,325	0,158
2	9,92	6,96	4,30	2,92	1,89	1,061	0,816	0,617	0,289	0,142
3	5,84	4,54	3,18	2,35	1,64	0,978	0,765	0,584	0,277	0,137
4	4,60	3,75	2,78	2,13	1,53	0,941	0,741	0,569	0,271	0,134
5	4,03	3,36	2,57	2,02	1,48	0,920	0,727	0,559	0,267	0,132
6	3,71	3,14	2,45	1,94	1,44	0,906	0,718	0,553	0,265	0,131
7	3,50	3,00	2,36	1,90	1,42	0,896	0,711	0,549	0,263	0,130
8	3,36	2,90	2,31	1,86	1,40	0,889	0,706	0,546	0,262	0,130
9	3,25	2,82	2,26	1,83	1,38	0,883	0,703	0,543	0,261	0,129
10	3,17	2,76	2,23	1,81	1,37	0,879	0,700	0,542	0,260	0,129
11	3,11	2,72	2,20	1,80	1,36	0,876	0,697	0,540	0,260	0,129
12	3,06	2,68	2,18	1,78	1,36	0,873	0,695	0,539	0,259	0,128
13	3,01	2,65	2,16	1,77	1,35	0,870	0,694	0,538	0,259	0,128
14	2,98	2,62	2,14	1,76	1,34	0,868	0,692	0,537	0,258	0,128
15	2,95	2,60	2,13	1,75	1,34	0,866	0,691	0,536	0,258	0,128
16	2,92	2,58	2,12	1,75	1,34	0,865	0,690	0,535	0,258	0,128
17	2,90	2,57	2,11	1,74	1,33	0,863	0,689	0,534	0,257	0,128
18	2,88	2,55	2,10	1,73	1,33	0,862	0,688	0,534	0,257	0,127
19	2,86	2,54	2,09	1,73	1,33	0,861	0,688	0,533	0,257	0,127
20	2,84	2,53	2,09	1,72	1,32	0,860	0,687	0,533	0,257	0,127
21	2,83	2,52	2,08	1,72	1,32	0,859	0,686	0,532	0,257	0,127
22	2,82	2,51	2,07	1,72	1,32	0,858	0,686	0,532	0,256	0,127
23	2,81	2,50	2,07	1,71	1,32	0,858	0,685	0,532	0,256	0,127
24	2,80	2,49	2,06	1,71	1,32	0,857	0,685	0,531	0,256	0,127
25	2,79	2,48	2,06	1,71	1,32	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127
26	2,78	2,48	2,06	1,71	1,32	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127
27	2,77	2,47	2,05	1,70	1,31	0,855	0,684	0,531	0,256	0,127
28	2,76	2,47	2,05	1,70	1,31	0,855	0,683	0,530	0,256	0,127
29	2,76	2,46	2,04	1,70	1,31	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127
30	2,75	2,46	2,04	1,70	1,31	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127
40	2,70	2,42	2,02	1,68	1,30	0,851	0,681	0,529	0,255	0,126
60	2,66	2,39	2,00	1,67	1,30	0,848	0,679	0,527	0,254	0,126
120	2,62	2,36	1,98	1,66	1,29	0,845	0,677	0,526	0,254	0,126
∞	2,58	2,33	1,96	1,645	1,28	0,842	0,674	0,524	0,253	0,126

Obs.: os valores destacados na tabela acima foram utilizados na determinação dos limites superior e inferior do intercepto e do coeficiente angular dos modelos de curva analisados no Capítulo 5, do presente trabalho.

Apêndice C

**Resultados Experimentais Coletados na
Literatura**

Tabela C.1 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Lew e Reichard [20] e os valores previstos por algumas equações ^a

Lew e Reichard (1978)	Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa		
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs
9,2	16001	16531	1,033	17990	1,124	14326	0,895	-	-	-	-
13,7	20898	18735	0,897	22006	1,053	17523	0,839	-	-	-	-
15,1	22622	19328	0,854	23085	1,021	18383	0,813	-	-	-	-
17,9	25933	20437	0,788	25105	0,968	19991	0,771	-	-	-	-
19,9	25243	21213	0,840	26520	1,051	21117	0,837	-	-	-	-
22,3	25174	22046	0,876	28036	1,114	22325	0,887	22570	0,897	25271	1,004
23,0	26967	22282	0,826	28467	1,056	22668	0,841	22811	0,846	25529	0,947
24,6	30899	22813	0,738	29433	0,953	23438	0,759	23351	0,756	26104	0,845
Média cal/obs		0,857		1,042		0,830		0,833		0,932	
Coefficiente de Variação (%)		16,491		7,118		17,605		17,713		9,479	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e brita calcária, curados à temperatura de 23° C e ensaiados nas idades de 1, 2, 3, 5, 7, 14, 21 e 28 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.2 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Nilson e Slate [10] e os valores previstos por algumas equações ^a

Nilson e Slate (1979)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa)	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
25,7	27726	23183	0,836	30108	1,086	23975	0,865	23728	0,856	26501	0,956
26,9	27243	23567	0,865	30807	1,131	24531	0,900	24119	0,885	26909	0,988
27,0	29381	23588	0,803	30846	1,050	24563	0,836	24141	0,822	26932	0,917
38,0	28829	26757	0,928	36618	1,270	29159	1,011	27367	0,949	30195	1,047
38,4	28898	26853	0,929	36793	1,273	29299	1,014	27465	0,950	30291	1,048
39,3	26898	27100	1,008	37244	1,385	29657	1,103	27716	1,030	30538	1,135
40,0	29105	27279	0,937	37569	1,291	29916	1,028	27898	0,959	30716	1,055
62,9	29036	32524	1,120	47123	1,623	37524	1,292	33238	1,145	35724	1,230
66,2	29933	33189	1,109	48334	1,615	38488	1,286	33915	1,133	36333	1,214
66,7	29657	33288	1,122	48515	1,636	38632	1,303	34016	1,147	36424	1,229
68,5	31588	33634	1,065	49145	1,556	39134	1,239	34368	1,088	36739	1,163
69,0	32209	33736	1,047	49331	1,532	39282	1,220	34472	1,070	36831	1,144
69,3	36485	33797	0,926	49441	1,355	39370	1,079	34534	0,947	36886	1,011
80,3	39313	-	-	53222	1,354	42381	1,078	36647	0,932	38744	0,986
81,2	35864	-	-	53532	1,493	42628	1,189	36820	1,027	38894	1,084
92,4	37244	-	-	57104	1,533	45472	1,221	-	-	-	-
93,6	39244	-	-	57476	1,465	45768	1,166	-	-	-	-
Média cal/obs		0,977		1,391		1,108		0,996		1,080	
Coefficiente de Variação (%)		10,875		43,135		18,070		10,150		12,662	

a - Resultados referentes a concretos fabricados com brita calcária e ensaiados entre as idades de 56 e 365 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

Tabela C.3 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Carrasquillo [10] e os valores previstos por algumas equações ^a

f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	Presente Estudo		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92		CEB-FIP MC / 90	
		$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
33,8	22346	25621	1,147	34549	1,546	27511	1,231	26210	1,173	29047	1,300
32,5	28623	25248	0,882	33870	1,183	26970	0,942	25831	0,902	28665	1,001
32,2	20484	25155	1,228	33700	1,645	26836	1,310	25736	1,256	28569	1,395
58,8	29588	31658	1,070	45545	1,539	36267	1,226	32356	1,094	34922	1,180
57,2	29450	31306	1,063	44904	1,525	35757	1,214	31998	1,087	34594	1,175
59,1	29036	31726	1,093	45670	1,573	36367	1,252	32426	1,117	34986	1,205
73,6	34554	-	-	50949	1,474	40571	1,174	35377	1,024	37633	1,089
76,2	36554	-	-	51851	1,418	41289	1,130	35881	0,982	38075	1,042
76,5	36761	-	-	51961	1,413	41377	1,126	35942	0,978	38129	1,037

^a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com brita calcária, curados à temperatura de 24° C.

^b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

^c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

Tabela C.3 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Carrasquillo [10] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Carrasquillo (1980)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80 -		ACI 318 / 89 -		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
33,8	22070	25621	1,161	34549	1,565	27511	1,247	26210	1,188	29047	1,316
32,0	21105	25108	1,190	33614	1,593	26766	1,268	25687	1,217	28520	1,351
31,5	20829	24964	1,199	33352	1,601	26558	1,275	25541	1,226	28372	1,362
54,2	22415	30659	1,368	43727	1,951	34819	1,553	31340	1,398	33986	1,516
48,9	23519	29467	1,253	41555	1,767	33090	1,407	30126	1,281	32851	1,397
49,3	20829	29543	1,418	41692	2,002	33200	1,594	30203	1,450	32924	1,581
64,1	27933	32751	1,173	47537	1,702	37853	1,355	33469	1,198	35933	1,286
65,7	25243	33084	1,311	48142	1,907	38335	1,519	33808	1,339	36237	1,436
65,5	25519	33053	1,295	48087	1,884	38291	1,501	33777	1,324	36209	1,419
72,9	25657	-	-	50719	1,977	40388	1,574	35248	1,374	37519	1,462
Média cal/obs		1,190		1,646		1,310		1,190		1,292	
Coefficiente de Variação (%)		23,005		68,032		35,429		24,159		33,549	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cascalho, curados à temperatura de 24° C.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alii* [27] e os valores previstos por algumas equações ^a

Shih <i>et alii</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
46,5	43361	28894	0,666	40510	0,934	32258	0,744	29542	0,681	32298	0,745
74,3	38513	-	-	51185	1,329	40759	1,058	35509	0,922	37749	0,980
61,3	41437	32176	0,777	46489	1,122	37019	0,893	32884	0,794	35403	0,854
58,7	37423	31645	0,846	45522	1,216	36249	0,969	32343	0,864	34910	0,933
49,0	43699	29476	0,675	41571	0,951	33103	0,758	30135	0,690	32860	0,752
50,6	42651	29858	0,700	42266	0,991	33657	0,789	30524	0,716	33225	0,779
54,2	39244	30668	0,781	43741	1,115	34831	0,888	31348	0,799	33994	0,866
68,6	42189	33666	0,798	49202	1,166	39180	0,929	34400	0,815	36767	0,871
67,1	39672	33365	0,841	48655	1,226	38744	0,977	34094	0,859	36494	0,920
68,1	47913	33557	0,700	49005	1,023	39023	0,814	34290	0,716	36669	0,765
84,2	47624	-	-	54520	1,145	43414	0,912	-	-	39371	0,827
73,3	40734	-	-	50845	1,248	40488	0,994	35318	0,867	37581	0,923
72,7	39251	-	-	50648	1,290	40331	1,028	35208	0,897	37484	0,955
72,7	40789	-	-	50648	1,242	40331	0,989	35208	0,863	37484	0,919
64,0	36595	32750	0,895	47535	1,299	37852	1,034	33468	0,915	35932	0,982
55,3	36416	30895	0,848	44156	1,213	35161	0,966	31580	0,867	34208	0,939
62,6	34692	32463	0,936	47012	1,355	37436	1,079	33176	0,956	35668	1,028
51,2	36106	29996	0,831	42518	1,178	33857	0,938	30664	0,849	33357	0,924
70,6	41175	-	-	49898	1,212	39734	0,965	34789	0,845	37113	0,901

^a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

^b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm x 100 mm e 100 mm x 200 mm.

^c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alli* [27] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Shih <i>et alli</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80 -		ACI 318 / 89 -		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
71,4	39361	-	-	50179	1,275	39957	1,015	34946	0,888	37252	0,946
58,3	39754	31556	0,794	45360	1,141	36120	0,909	32252	0,811	34827	0,876
72,6	39637	-	-	50613	1,277	40303	1,017	35189	0,888	37467	0,945
68,9	41582	33725	0,811	49311	1,186	39266	0,944	34461	0,829	36821	0,886
72,7	43996	-	-	50648	1,151	40331	0,917	35208	0,800	37484	0,852
50,5	32016	29828	0,932	42212	1,319	33613	1,050	30493	0,952	33197	1,037
58,6	32354	31607	0,977	45453	1,405	36194	1,119	32305	0,999	34875	1,078
63,2	32726	32577	0,995	47219	1,443	37601	1,149	33292	1,017	35773	1,093
53,6	36189	30532	0,844	43495	1,202	34635	0,957	31210	0,862	33866	0,936
53,2	37113	30448	0,820	43342	1,168	34513	0,930	31125	0,839	33787	0,910
66,4	34782	33219	0,955	48388	1,391	38532	1,108	33945	0,976	36361	1,045
70,3	38154	-	-	49814	1,306	39667	1,040	34742	0,911	37071	0,972
72,9	38285	-	-	50727	1,325	40393	1,055	35252	0,921	37523	0,980
72,9	36940	-	-	50732	1,373	40397	1,094	35255	0,954	37525	1,016
72,7	40472	-	-	50648	1,251	40331	0,997	35208	0,870	37484	0,926
72,7	40334	-	-	50648	1,256	40331	1,000	35208	0,873	37484	0,929
72,7	38616	-	-	50648	1,315	40311	1,044	35208	0,912	37484	0,971
68,5	39161	33644	0,859	49163	1,255	39148	1,000	34378	0,878	36748	0,938
64,4	37858	32813	0,867	47648	1,259	37942	1,002	33532	0,886	35989	0,951

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alli* [27] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Shih <i>et alli</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80 -		ACI 318 / 89 -		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
68,3	35333	33611	0,951	49104	1,390	39101	1,107	34345	0,972	36718	1,039
65,5	40492	33040	0,816	48063	1,187	38272	0,945	33763	0,834	36197	0,894
76,0	39320	-	-	51787	1,317	41238	1,049	35845	0,912	38044	0,968
73,4	39147	-	-	50894	1,300	40527	1,035	35346	0,903	37606	0,961
74,1	40285	-	-	51131	1,269	40716	1,011	35478	0,881	37722	0,936
73,5	41872	-	-	50939	1,217	40562	0,969	35371	0,845	37627	0,899
68,3	40554	33601	0,829	49084	1,210	39085	0,964	34334	0,847	36708	0,905
82,7	41341	-	-	54002	1,306	43002	1,040	37083	0,897	39121	0,946
84,3	44058	-	-	54540	1,238	43430	0,986	-	-	39381	0,894
76,1	46141	-	-	51807	1,123	41254	0,894	35856	0,777	38054	0,825
58,9	38416	31672	0,824	45572	1,186	36289	0,945	32371	0,843	34936	0,909
68,1	44010	33557	0,762	49005	1,114	39023	0,887	34290	0,779	36669	0,833
60,9	41189	32106	0,779	46361	1,126	36917	0,896	32812	0,797	35338	0,858
70,5	36720	-	-	49883	1,358	39722	1,082	34781	0,947	37106	1,011
63,9	41665	32729	0,786	47496	1,140	37821	0,908	33446	0,803	35912	0,862
66,8	37602	33305	0,886	48546	1,291	38657	1,028	34034	0,905	36440	0,969
70,7	42051	-	-	49937	1,188	39765	0,946	34811	0,828	37133	0,883
68,5	40492	33644	0,831	49163	1,214	39148	0,967	34378	0,849	36748	0,908
56,3	46444	31112	0,670	44550	0,959	35475	0,764	31800	0,685	34412	0,741

^a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

^b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.

^c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alii* [27] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Shih <i>et alii</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
70,3	40168	-	-	49789	1,240	39647	0,987	34728	0,865	37059	0,923
71,4	41851	-	-	50174	1,199	39954	0,955	34943	0,835	37250	0,890
67,2	40803	33392	0,818	48704	1,194	38783	0,951	34122	0,836	36519	0,895
60,6	40030	32049	0,801	46257	1,156	36835	0,920	32754	0,818	35285	0,881
71,1	43141	-	-	50076	1,161	39875	0,924	34888	0,809	37201	0,862
69,0	39485	33750	0,854	49355	1,250	39301	0,995	34486	0,873	36844	0,933
59,0	44486	31702	0,713	45626	1,026	36332	0,817	32401	0,728	34963	0,786
59,8	40996	31875	0,778	45942	1,121	36583	0,892	32578	0,795	35124	0,857
67,0	37740	33349	0,884	48625	1,288	38720	1,026	34078	0,903	36479	0,967
67,4	42479	33419	0,787	48753	1,148	38822	0,914	34149	0,804	36543	0,860
63,3	38816	32607	0,840	47274	1,218	37644	0,970	33322	0,859	35800	0,922
65,8	35864	33108	0,923	48186	1,344	38370	1,070	33832	0,943	36259	1,011
69,4	36195	33828	0,935	49498	1,368	39415	1,089	34566	0,955	36915	1,020
65,5	36968	33037	0,894	48058	1,300	38268	1,035	33761	0,913	36195	0,979
68,0	40899	33538	0,820	48971	1,197	38995	0,953	34271	0,838	36652	0,896
64,7	37561	32875	0,875	47762	1,272	38033	1,013	33595	0,894	36046	0,960
45,1	26284	28563	1,087	39908	1,518	31779	1,209	29206	1,111	31978	0,217
44,5	28126	28401	1,010	39612	1,408	31543	1,122	29040	1,033	31819	1,131
43,2	26740	28098	1,051	39060	1,461	31103	1,163	28732	1,075	31523	1,179

^a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

^b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.

^c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alli* [27] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Shih <i>et alli</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f _c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92		CEB-FIP MC / 90	
f _c (MPa) ^b	(E _c) _{obs} (MPa) ^c	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/ obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/ obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/ obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/ obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/ obs
46,5	25264	28880	1,143	40486	1,603	32239	1,276	29528	1,169	32285	1,278
43,4	25415	28127	1,107	39114	1,539	31147	1,226	28762	1,132	31552	1,241
43,9	26940	28263	1,049	39361	1,461	31343	1,163	28900	1,073	31685	1,176
41,1	24119	27561	1,143	38083	1,579	30326	1,257	28186	1,169	30995	1,285
45,8	23195	28715	1,238	40185	1,733	31999	1,380	29360	1,266	32125	1,385
43,1	27153	28051	1,033	38976	1,435	31037	1,143	28685	1,056	31478	1,159
44,3	24464	28366	1,160	39548	1,617	31492	1,287	29004	1,186	31785	1,299
41,5	27926	27659	0,990	38261	1,370	30467	1,091	28285	1,013	31091	1,113
40,3	22657	27345	1,207	37689	1,664	30011	1,325	27965	1,234	30781	1,359
36,2	28767	26275	0,913	35740	1,242	28460	0,989	26876	0,934	29710	1,033
44,5	32802	28414	0,866	39637	1,208	31563	0,962	29054	0,886	31833	0,970
37,6	26457	26643	1,007	36411	1,376	28994	1,096	27251	1,030	30081	1,137
34,6	30774	25831	0,839	34931	1,135	27815	0,904	26424	0,859	29260	0,951
27,9	31168	23889	0,766	31394	1,007	24999	0,802	24447	0,784	27250	0,874
42,5	29181	27916	0,957	38729	1,327	30840	1,057	28547	0,978	31345	1,074
37,5	23305	26622	1,142	36371	1,561	28962	1,243	27229	1,168	30059	1,290
32,9	20753	25370	1,222	34092	1,643	27148	1,308	25955	1,251	28790	1,387
40,6	20829	27434	1,317	37851	1,817	30141	1,447	28056	1,347	30869	1,482
41,5	31319	27656	0,883	38256	1,222	30463	0,973	28282	0,903	31089	0,993

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alli* [27] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Shih <i>et alli</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80 -		ACI 318 / 89 -		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
44,4	23526	28371	1,206	39558	1,682	31500	1,339	29010	1,233	31790	1,351
39,1	21836	27055	1,239	37161	1,702	29591	1,355	27670	1,267	30493	1,396
39,5	24305	27155	1,117	37343	1,536	29736	1,224	27772	1,143	30592	1,259
45,1	24657	28563	1,158	39908	1,619	31779	1,289	29206	1,185	31978	1,297
47,2	25533	29045	1,138	40787	1,597	32478	1,272	29697	1,163	32445	1,271
44,8	25471	28474	1,118	39746	1,561	31649	1,243	29115	1,143	31891	1,252
52,8	28885	30356	1,051	43174	1,495	34379	1,190	31031	1,074	33699	1,167
50,2	27602	29758	1,078	42084	1,525	33511	1,214	30422	1,102	33130	1,200
46,9	24588	28989	1,179	40683	1,655	32396	1,318	29639	1,205	32390	1,317
42,8	28795	27992	0,972	38868	1,350	30950	1,075	28624	0,994	31419	1,091
42,8	24271	27992	1,153	38868	1,601	30950	1,275	28624	1,179	31419	1,295
38,0	21670	26757	1,235	36618	1,690	29159	1,346	27367	1,263	30195	1,393
44,2	22870	28339	1,239	39499	1,727	31453	1,375	28977	1,267	31759	1,389
43,6	25319	28190	1,113	39228	1,549	31237	1,234	28825	1,139	31613	1,249
40,4	25153	27388	1,089	37768	1,502	30074	1,196	28009	1,114	30824	1,225
23,6	20001	22500	1,125	28863	1,443	22984	1,149	23032	1,152	25765	1,288
42,0	28850	27783	0,963	38488	1,334	30648	1,062	28412	0,985	31214	1,082
42,0	26491	27783	1,049	38488	1,453	30648	1,157	28412	1,073	31241	1,178
40,3	28098	27353	0,974	37703	1,342	30023	1,069	27973	0,996	30789	1,096

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.4 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Shih *et alii* [27] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Shih <i>et alii</i> (1989)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80 -		ACI 318 / 89 -		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs
40,1	25071	27296	1,089	37600	1,500	29941	1,194	27915	1,113	30732	1,226
42,8	25202	27989	1,111	38863	1,542	30946	1,228	28621	1,136	31417	1,247
43,6	25657	28181	1,098	39213	1,528	31225	1,217	28817	1,123	31605	1,232
46,1	26160	28796	1,101	40333	1,542	32117	1,228	29443	1,125	32204	1,231
41,7	25167	27716	1,101	38364	1,524	30549	1,214	28343	1,126	31148	1,238
43,1	27933	28060	1,005	38991	1,396	31048	1,112	28693	1,027	31486	1,127
38,8	25126	26976	1,074	37018	1,473	29477	1,173	27590	1,098	30414	1,210
41,0	29761	27542	0,925	38049	1,279	30298	1,018	28166	0,946	30976	1,041
31,7	23760	25013	1,053	33441	1,407	26629	1,121	25591	1,077	28422	1,196
35,7	21312	26131	1,226	35479	1,665	28251	1,326	26730	1,254	29565	1,387
39,8	29271	27225	0,930	37472	1,280	29838	1,019	27844	0,951	30662	1,048
36,4	26622	26318	0,989	35819	1,345	28523	1,071	26920	1,011	29754	1,118
45,2	26650	28571	1,072	39923	1,498	31791	1,193	29214	1,096	31986	1,200
43,8	21739	28236	1,299	39312	1,808	31304	1,440	28872	1,328	31658	1,456
46,6	22250	28902	1,299	40525	1,821	32270	1,450	29550	1,328	32306	1,452
Média cal/obs		0,965		1,336		1,064		0,965		1,044	
Coefficiente de Variação (%)		16,586		38,797		16,667		16,017		18,532	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, brita calcária e cascalho e ensaiados entre as idades de 14 e 84 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200mm.

Tabela C.5 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Oluokun [31] e os valores previstos por algumas equações ^a

Oluokun (1991)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
10,7	15640	17309	1,107	19409	1,241	15455	0,988	-	-	-	-
20,3	22674	21343	0,941	26757	1,180	21307	0,940	-	-	24496	1,080
24,8	26204	22894	0,874	29582	1,129	23556	0,899	23434	0,894	26191	0,999
27,4	27627	23737	0,859	31117	1,126	24779	0,897	24292	0,879	27090	0,981
29,9	28857	24493	0,849	32495	1,126	25875	0,897	25062	0,869	27883	0,966
35,7	31699	26138	0,825	35491	1,120	28261	0,892	26737	0,844	29572	0,933
46,4	35393	28855	0,815	40439	1,143	32201	0,910	29502	0,834	32261	0,912
1,3	2844	-	-	6764	2,379	5386	1,894	-	-	-	-
4,6	13412	-	-	12759	0,951	10160	0,758	-	-	-	-
7,8	16367	-	-	16612	1,015	13228	0,808	-	-	-	-
12,2	19412	18041	0,929	20742	1,069	16517	0,851	-	-	-	-
14,3	21636	18990	0,878	22471	1,039	17894	0,827	-	-	-	-
18,6	24503	20711	0,845	25604	1,045	20389	0,832	-	-	-	-
28,0	31445	23910	0,760	31433	1,000	25030	0,796	24468	0,778	27273	0867
2,6	5838	-	-	9642	1,651	7678	1,315	-	-	-	-
12,2	19156	18054	0,942	20766	1,084	16536	0,863	-	-	-	-
18,7	22317	20750	0,930	25676	1,151	20445	0,916	-	-	-	-

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e brita calcária, curados à temperatura de 23° C e ensaiados nas idades de 6, 12 e 24 horas e 2, 3, 7 e 28 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.5 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Oluokun [31] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Oluokun (1991)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) ^c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
23,9	25792	22598	0,876	29042	1,126	23126	0,897	23132	0,897	25872	1,003
26,5	26518	23436	0,883	30569	1,153	24342	0,918	23986	0,905	26771	1,010
35,5	30612	26070	0,852	35367	1,155	28163	0,920	26667	0,871	29503	0,964
44,2	34337	28323	0,825	39471	1,150	31430	0,915	28961	0,843	31744	0,924
10,1	15380	17006	1,106	18856	1,226	15015	0,976	-	-	-	-
26,8	28076	23528	0,838	30736	1,095	24475	0,872	24079	0,858	26868	0,957
35,9	31204	26204	0,840	35610	1,141	28356	0,909	26803	0,859	29639	0,950
44,2	35106	28342	0,807	39505	1,125	31457	0,896	28980	0,826	31762	0,905
46,2	35429	28825	0,814	40385	1,140	32158	0,908	29472	0,832	32232	0,910
50,1	36218	29742	0,821	42056	1,161	33489	0,925	30406	0,840	33115	0,914
61,0	40306	32120	0,797	46387	1,151	36937	0,916	32826	0,814	35351	0,877
Média cal/obs		0,876		1,181		0,941		0,853		0,950	
Coefficiente de Variação (%)		14,969		31,616		21,469		15,092		7,239	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e brita calcária, curados à temperatura de 23° C e ensaiados nas idades de 6, 12 e 24 horas e 2, 3, 7 e 28 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.6 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente no presente estudo e os valores previstos por algumas equações ^a

f _c (MPa)	Flor (1994)	Presente Estudo 10 MPa < f _c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f _c < 88 MPa	
		(E _c) _{cal} (MPa)	cal/obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/obs	(E _c) _{cal} (MPa)	cal/obs
9,7	13137	16810	1,280	18500	1,408	14732	1,121	-	-	-	-
21,1	21331	21633	1,014	27285	1,279	21727	1,019	22150	1,038	24817	1,163
25,5	29186	23121	0,792	29996	1,028	23885	0,818	23665	0,811	26435	0,906
26,0	23305	23282	0,999	30288	1,300	24118	1,035	23829	1,022	26606	1,142
30,5	23434	24663	1,052	32805	1,400	26122	1,115	25235	1,077	28061	1,197
29,6	27801	24396	0,878	32317	1,162	25734	0,926	24963	0,898	27782	0,999
29,2	23192	2475	1,047	32098	1,384	25560	1,102	24840	1,071	27656	1,192
41,2	28265	27585	0,976	38127	1,349	30361	1,074	28210	0,998	31019	1,097
52,0	29080	30169	1,037	42834	1,473	34109	1,173	30841	1,061	33522	1,153
50,5	27109	29828	1,100	42212	1,557	33613	1,240	30493	1,125	33197	1,225
49,3	25933	29551	1,140	41707	1,608	33211	1,281	30211	1,165	32932	1,270
58,5	26213	31596	1,205	45432	1,733	36178	1,380	32293	1,232	34864	1,330
30,7	24753	24722	0,999	32912	1,330	26208	1,059	25295	1,022	28122	1,136
51,2	28127	29988	1,066	42503	1,511	33845	1,203	30656	1,090	33349	1,186
57,7	26875	31425	1,169	45121	1,679	35929	1,337	32119	1,195	34705	1,291

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento de alta resistência inicial e brita calcária, ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.6 - Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente no presente estudo e os valores previstos por algumas equações (continuação) a

Flor (1994)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		NBR 6118 / 80		ACI 318 / 89		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa		CEB-FIP MC / 90 20 MPa < f_c < 88 MPa	
f_c (MPa) b	$(E_c)_{obs}$ (MPa) c	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs	$(E_c)_{cal}$ (MPa)	cal/obs
56,3	33145	31122	0,939	44570	1,345	35491	1,071	31811	0,960	34422	1,039
58,1	32433	31510	0,972	45277	1,396	36054	1,112	32206	0,993	34785	1,073
67,9	34421	33525	0,974	48946	1,422	38976	1,132	34257	0,995	36640	1,064
33,1	27006	25415	0,941	34174	1,265	27213	1,008	26001	0,963	28836	1,068
47,9	30788	29223	0,949	41111	1,335	32736	1,063	29878	0,970	32617	1,059
60,2	32440	31956	0,985	46088	1,421	36699	1,131	32659	1,007	35199	1,085
59,2	33066	31745	0,960	45703	1,382	36393	1,101	32445	0,981	35003	1,059
58,9	33381	31681	0,949	45587	1,366	36301	1,087	32380	0,970	34944	1,047
58,7	36437	31638	0,868	45510	1,249	36239	0,995	32336	0,887	34904	0,958
Média cal/obs			1,012		1,391		1,108		1,023		1,119
Coefficiente de Variação (%)			10,825		41,925		16,163		9,868		15,718

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento de alta resistência inicial e brita calcária, ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

c - medido em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.7 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Gardner e Poon [19] e os valores previstos por algumas equações ^a

Gardner e Poon (1976)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(f_t)_{obs}$ (MPa) ^c	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
6,3	1,10	-	-	-	-
11,3	1,88	1,74	0,926	-	-
17,6	2,66	2,30	0,865	-	-
21,0	2,92	2,56	0,878	2,71	0,927
24,4	3,17	2,8	0,885	2,92	0,921
26,8	3,56	2,96	0,830	3,05	0,857
17,0	2,63	2,25	0,856	-	-
23,4	3,10	2,73	0,880	2,85	0,919
26,5	3,33	2,94	0,882	3,04	0,911
29,4	3,54	3,13	0,883	3,20	0,905
34,4	3,79	3,42	0,901	3,46	0,912
37,0	4,01	3,57	0,888	3,59	0,894
Média cal/obs		0,880		0,906	
Coeficiente de Variação (%)		12,266		9,632	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e de alta resistência inicial, curados à temperatura de 22° C e ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias e 3 meses.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.8 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Lew e Reichard [20] e os valores previstos por algumas equações ^a

Lew e Reichard (1978)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(f_t)_{obs}$ (MPa) ^c	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
9,2	1,38	1,52	1,101	-	-
13,7	1,73	1,97	1,139	-	-
15,1	2,01	2,09	1,040	-	-
17,9	2,15	2,32	1,079	-	-
19,9	2,27	2,48	1,093	-	-
22,3	2,66	2,65	0,996	2,78	1,046
23,0	2,80	2,70	0,965	2,83	1,010
24,6	2,99	2,81	0,939	2,92	0,977
Média cal/obs		1,045		1,012	
Coefficiente de Variação (%)		8,018		3,055	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e brita calcária, curados à temperatura de 23° C e ensaiados nas idades de 1, 2, 3, 5, 7, 14, 21 e 28 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.9 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Carrasquillo [10] e os valores previstos por algumas equações ^a

Carrasquillo (1980)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(f_t)_{obs}$ (MPa) ^c	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
15,5	2,83	2,13	0,754	-	-
15,5	2,61	2,13	0,817	-	-
15,5	2,58	2,13	0,826	-	-
23,0	2,88	2,70	0,937	2,83	0,981
23,0	2,97	2,70	0,911	2,83	0,954
23,0	2,86	2,70	0,946	2,83	0,991
25,9	3,12	2,90	0,928	3,00	0,961
25,9	3,28	2,90	0,883	3,00	0,914
25,9	3,08	2,90	0,942	3,00	0,976
36,4	3,73	3,53	0,947	3,56	0,955
36,4	3,62	3,53	0,976	3,56	0,984
36,4	3,37	3,53	1,048	3,56	1,056
47,8	4,50	4,12	0,916	4,08	0,906
47,8	3,98	4,12	1,036	4,08	1,025
47,8	3,90	4,12	1,058	4,08	1,047
56,0	5,02	4,50	0,897	4,41	0,879
56,0	4,50	4,50	1,000	4,41	0,980
56,0	4,57	4,50	0,986	4,41	0,967
57,9	4,88	4,59	0,939	4,49	0,919
57,9	4,55	4,59	1,008	4,49	0,986
57,9	4,69	4,59	0,978	4,49	0,957
70,4	5,34	-	-	4,95	0,928
70,4	5,60	-	-	4,95	0,884
70,4	5,43	-	-	4,95	0,911
79,7	6,21	-	-	5,27	0,848
79,7	6,36	-	-	5,27	0,829
79,7	6,11	-	-	5,27	0,862
Média cal/obs		0,940		0,969	
Coefficiente de Variação (%)		9,623		5,451	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum e brita calcária e ensaiados nas idades de 7, 28 e 95 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

Tabela C.10 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Macedo *et alli* [26] e os valores previstos por algumas equações ^a

Macedo <i>et alli</i> (1988)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	(f_t) _{obs} (MPa) ^c	(f_t) _{cal} (MPa)	cal/ obs	(f_t) _{cal} (MPa)	cal/ obs
42,5	4,00	3,86	0,964	3,85	0,962
37,5	4,10	3,59	0,876	3,61	0,881
31,9	3,50	3,27	0,935	3,33	0,952
29,4	3,30	3,12	0,946	3,20	0,969
23,0	2,90	2,70	0,932	2,83	0,976
42,6	4,20	3,86	0,920	3,85	0,917
36,1	3,50	3,52	1,004	3,54	1,013
33,7	3,30	3,38	1,024	3,43	1,038
29,0	2,80	3,10	1,106	3,18	1,135
24,0	3,00	2,77	0,924	2,89	0,963
42,5	3,70	3,86	1,043	3,85	1,040
37,7	3,60	3,60	1,001	3,62	1,006
31,8	3,50	3,27	0,934	3,33	0,951
30,4	3,40	3,18	0,937	3,25	0,957
25,7	2,90	2,89	0,995	2,99	1,031
37,4	3,10	3,59	1,157	3,61	1,164
32,9	2,70	3,33	1,234	3,38	1,253
30,5	2,30	3,19	1,387	3,26	1,417
24,4	2,70	2,80	1,037	2,91	1,079
23,0	2,50	2,70	1,081	2,83	1,132
Média cal/obs		1,022		1,042	
Coeficiente de Variação (%)		12,249		13,090	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento Portland comum e diferentes tipo de agregados graúdos (calcário, granito, basalto e seixo rolado) e ensaiados na idade de 7 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.11 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Gardner [29] e os valores previstos por algumas equações ^a

Gardner (1990)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(f_t)_{obs}$ (MPa) ^c	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
10,1	1,72	1,62	0,943	-	-
20,2	2,67	2,50	0,936	-	-
24,9	3,23	2,83	0,877	2,94	0,911
34,0	3,52	3,40	0,965	3,44	0,977
38,5	4,15	3,65	0,879	3,66	0,882
48,8	5,08	4,17	0,821	4,12	0,812
50,5	4,85	4,25	0,876	4,19	0,864
12,0	1,92	1,81	0,942	-	-
28,2	2,99	3,05	1,019	3,13	1,048
34,6	3,47	3,43	0,989	3,47	1,000
40,2	4,31	3,74	0,867	3,74	0,868
47,5	4,37	4,11	0,940	4,07	0,931
54,2	4,13	4,42	1,070	4,34	1,051
55,8	5,57	4,49	0,807	4,41	0,791
10,2	1,73	1,63	0,943	-	-
20,0	2,87	2,49	0,866	-	-
27,7	2,91	3,02	1,037	3,11	1,067
31,0	3,64	3,22	0,884	3,28	0,902
35,2	3,84	3,46	0,902	3,50	0,911
38,9	4,15	3,67	0,884	3,68	0,887
42,6	3,05	3,86	1,267	3,85	1,263
20,7	2,36	2,53	1,074	-	-
29,3	3,29	3,12	0,948	3,19	0,971

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum, cimento comum/cinza volante e cimento de alta resistência inicial, curados à temperatura de 20° C e ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 e 112 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.11 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Gardner [29] e os valores previstos por algumas equações (continuação) ^a

Gardner (1990)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(f_t)_{obs}$ (MPa) ^c	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
39,1	3,55	3,68	1,036	3,69	1,039
42,8	3,87	3,87	1,000	3,86	0,997
46,6	4,49	4,06	0,905	4,03	0,897
49,9	4,30	4,22	0,982	4,17	0,969
54,3	4,61	4,43	0,960	4,35	0,943
27,9	3,21	3,03	0,944	3,12	0,972
35,7	3,59	3,49	0,972	3,52	0,981
39,1	3,84	3,68	0,958	3,69	0,961
42,4	4,39	3,85	0,877	3,84	0,875
44,5	4,50	3,96	0,880	3,93	0,874
55,8	4,90	4,49	0,917	4,41	0,899
56,7	4,89	4,54	0,928	4,44	0,909
22,1	2,77	2,64	0,954	2,78	1,002
31,6	3,37	3,26	0,966	3,32	0,984
34,3	3,43	3,42	0,996	3,46	1,008
36,7	3,75	3,55	0,947	3,58	0,953
39,9	3,79	3,72	0,982	3,73	0,984
43,8	4,48	3,93	0,876	3,91	0,872
44,3	4,62	3,95	0,855	3,93	0,850
Média cal/obs		0,943		0,947	
Coefficiente de Variação (%)		9,615		10,033	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum, cimento comum/cinza volante e cimento de alta resistência inicial, curados à temperatura de 20° C e ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 e 112 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.12 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente por Oluokun [31] e os valores previstos por algumas equações ^a

Oluokun (1991)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	$(f_t)_{obs}$ (MPa) ^c	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs	$(f_t)_{cal}$ (MPa)	cal/ obs
10,7	1,22	1,68	1,376	-	-
20,3	1,99	2,51	1,258	-	-
24,8	2,52	2,83	1,120	2,94	1,164
27,4	2,79	3,00	1,074	3,09	1,107
29,9	2,90	3,16	1,089	3,23	1,114
35,7	3,50	3,49	0,999	3,53	1,008
46,4	4,12	4,05	0,984	4,02	0,976
1,3	0,11	-	-	-	-
4,6	0,48	-	-	-	-
7,8	1,07	-	-	-	-
12,2	1,26	1,83	1,458	-	-
14,3	1,91	2,02	1,060	-	-
28,6	2,10	2,38	1,130	-	-
28,0	3,14	3,04	0,967	3,12	0,995
2,6	0,21	-	-	-	-
12,2	1,33	1,83	1,376	-	-
18,7	1,94	2,39	1,231	-	-
23,9	2,86	2,77	0,966	2,88	1,008
26,5	3,08	2,94	0,953	3,04	0,985
35,5	3,88	3,48	0,896	3,51	0,905
44,2	4,76	3,94	0,828	3,92	0,824
10,1	0,83	1,62	1,937	-	-
26,8	2,49	2,96	1,188	3,05	1,226
35,9	3,32	3,51	1,057	3,54	1,066
44,2	4,02	3,95	0,981	3,92	0,976
46,2	4,19	4,05	0,966	4,01	0,958
50,1	4,35	4,23	0,974	4,18	0,961
61,0	5,30	4,72	0,891	4,61	0,870
Média cal/obs		1,106		1,009	
Coefficiente de Variação (%)		25,839		10,289	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento comum, curados à temperatura de 23° C e ensaiados nas idades de 6, 12 e 24 horas e 2, 3, 7 e 28 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.

Tabela C.13 - Comparação entre os valores da resistência à tração, determinada pelo ensaio de compressão diametral, observados experimentalmente no presente estudo e os valores previstos por algumas equações ^a

Flor (1994)		Presente Estudo 10 MPa < f_c < 70 MPa		ACI 363 / 92 21 MPa < f_c < 83 MPa	
f_c (MPa) ^b	(f_t) _{obs} (MPa) ^c	(f_t) _{cal} (MPa)	cal/ obs	(f_t) _{cal} (MPa)	cal/ obs
9,7	1,40	1,58	1,126	-	-
21,1	2,60	2,57	0,988	2,71	1,042
25,5	2,80	2,87	1,026	2,98	1,064
26,0	2,70	2,91	1,076	3,01	1,114
30,5	2,70	3,19	1,182	3,26	1,207
29,6	3,35	3,14	0,936	3,21	0,958
29,2	3,10	3,11	1,003	3,19	1,028
41,2	3,65	3,79	1,039	3,79	1,038
52,0	4,15	4,32	1,041	4,25	1,025
50,5	3,75	4,25	1,134	4,19	1,118
49,3	3,90	4,19	1,075	4,14	1,062
58,5	4,30	4,61	1,073	4,51	1,049
30,7	3,55	3,20	0,902	3,27	0,921
51,2	4,65	4,28	0,921	4,22	0,908
57,7	4,90	4,58	0,935	4,48	0,915
56,3	4,40	4,52	1,027	4,43	1,006
58,1	4,55	4,60	1,010	4,50	0,988
67,9	4,70	5,01	1,066	4,86	1,034
33,1	3,70	3,34	0,904	3,39	0,917
47,9	4,80	4,13	0,860	4,08	0,801
60,2	5,00	4,69	0,938	4,58	0,916
59,2	4,40	4,65	1,056	4,54	1,032
58,9	4,45	4,63	1,041	4,53	1,018
58,7	4,70	4,62	0,984	4,52	0,962
Média cal/obs		1,014		1,008	
Coefficiente de Variação (%)		8,033		8,048	

a - Resultados referentes a concretos de peso específico normal, fabricados com cimento Portland de alta resistência inicial, curados à temperatura de 23° C e ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias.

b - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm.

c - medida em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm.