



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**VICTOR GUSTAVO CHIARI**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LUVAS DE AÇO  
PARA EMENDAS MECÂNICAS EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO ARMADO**

**CAMPINAS**

**2018**

**VICTOR GUSTAVO CHIARI**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LUVAS DE AÇO  
PARA EMENDAS MECÂNICAS EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO ARMADO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Estruturas e Geotécnica.

**Orientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO VICTOR GUSTAVO CHIARI E ORIENTADO PELO PROF. DR. ARMANDO LOPES MORENO JUNIOR.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

---

**CAMPINAS**

**2018**

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C431a Chiari, Victor Gustavo, 1982-  
Avaliação experimental de luvas de aço para emendas mecânicas em estruturas de concreto armado / Victor Gustavo Chiari. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Armando Lopes Moreno Junior.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Luvas. 2. Concreto armado. 3. Barras de aço. 4. Barras de aço - Normas. 5. Aço - Estruturas - Normas. I. Moreno Junior, Armando Lopes, 1964-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Experimental evaluation of coupler behavior for mechanical rebar splices in reinforced concrete structures

**Palavras-chave em inglês:**

Couplers

Concrete

Steel bars

Steel Bars - Standards

Steel - Structures - Standards

**Área de concentração:** Estruturas e Geotécnica

**Titulação:** Mestre em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Armando Lopes Moreno Junior [Orientador]

Leandro Mouta Trautwein

Marcelo de Araújo Ferreira

**Data de defesa:** 23-02-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LUVAS DE AÇO PARA  
EMENDAS MECÂNICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO**

**Victor Gustavo Chiari**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

**Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior  
Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas**

**Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein  
Universidade Estadual de Campinas**

**Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira  
Universidade Federal de São Carlos**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 23 de Fevereiro de 2018

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, por tudo.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado, por me proporcionar sabedoria, saúde, por não me deixar fraquejar nos momentos de dificuldade e me fazer vencer todos os obstáculos que estiveram em meu caminho durante estes últimos 10 anos. Sem Ele, nada disso seria possível. *Obrigado, Pai.*

Agradeço aos meus pais, Natalino Chiari e Sandra Spadaccia Chiari, que dedicaram suas vidas para que eu pudesse ter a oportunidade de estudar e possuir uma formação. Espero que a realização deste mestrado seja, ao menos, uma pequena recompensa a todo o esforço deles. *Vocês são os exemplos de que o impossível não existe, basta se dedicar. Amo vocês.*

Agradeço à minha esposa e amiga, Karen Henriques Giamboni Chiari, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos e que soube compreender minha abdicação durante o período de desenvolvimento do mestrado. Mulher dedicada, batalhadora, mãe exemplar e merecedora de seu sucesso. *Ka, te amo muito, e, sem você, nada disso seria possível.*

À minha fonte de inspiração, minha vida, minha filha Carolina Chiari, que mesmo com apenas cinco anos de idade, compreendeu que o período em que estive ausente sempre teve um bom propósito. Menina inteligente e que cativa a todos somente com seu olhar e sorriso. Não tenho a menor dúvida que terá muito sucesso na vida. *Minha princesa, isto tudo valeu a pena por você.*

Agradeço à empresa Pentair, principalmente à linha LENTON, pelo “patrocínio”, fornecimento das luvas e extensômetros, além da permissão na dedicação parcial de tempo a este mestrado. Um agradecimento especial a três pessoas que acreditaram em mim e no meu potencial desde o princípio da minha caminhada como engenheiro da empresa: meus amigos Marcelo de Carvalho Lugli, Enio Calçavara Junior e Louis James Colarusso. Todos eles sempre apoiaram e acreditaram no sucesso deste projeto, ajudando em tudo aquilo que foi necessário. Seria injusto de minha parte não mencionar todos os nomes que me auxiliaram nesta pesquisa, portanto para não correr o risco de esquecer alguém, deixo aqui o meu muito obrigado a todos.

Agradeço muito ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior, por me apresentar a engenharia estrutural ainda na graduação e por ter feito o convite para desenvolver esta pesquisa na UNICAMP, demonstrando total confiança e apoio ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à empresa ArcelorMittal, especialmente ao Antonio Pereira, pelo fornecimento de toda a barra de aço utilizada nesta pesquisa, sem qualquer tipo de questionamento.

Não poderia deixar de agradecer ao Instituto Militar de Engenharia, principalmente ao Prof. Dr. Luiz Antonio Vieira Carneiro, pelos ensinamentos e por ter aberto as portas do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME para que eu pudesse realizar a primeira fase do programa experimental, engrandecendo muito o resultado final deste mestrado. *Prof. Carneiro, muito obrigado.*

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais da UNICAMP, Luciano Passos e Marcelo Francisco Ramos por todo apoio e organização na realização da segunda fase do programa experimental. Todas as conversas antes, durante e após os ensaios, foram de fundamental importância para esta pesquisa.

Ao meu amigo Carlos Amado Britez pela ajuda e “consultoria” no desenvolvimento desta dissertação. O Carlos foi muito importante, principalmente na fase final desta pesquisa, quando dedicou seu tempo para corrigir e comentar os pontos que julgava serem primordiais para que o leitor compreendesse, de maneira clara e simples, os objetivos propostos. *Valeu, Carlos.*

À empresa Leonardi Construção Industrializada, especialmente na pessoa de Marcelo Cuadrado, pelas discussões acerca da pesquisa e pelo fornecimento de algumas amostras.

Finalmente, agradeço à Luciana Paes de Barros pela constante troca de ideias a respeito de nossas pesquisas e por ter realizado todos os desenhos necessários que estão presentes no escopo desta dissertação.

## RESUMO

A utilização de emendas mecânicas para unir barras de aço é uma importante solução em muitas obras de infraestrutura no mundo todo. No Brasil, este sistema ainda é pouco difundido. Além disso, a normatização Brasileira sobre o assunto é antiga, está defasada e carece de atualização, principalmente no que diz respeito aos métodos de ensaio para avaliação de desempenho destas emendas em programas experimentais. Esta pesquisa apresenta e discute o procedimento de ensaio proposto na norma internacional ISO 15835 (2009) à luz do procedimento atual da norma brasileira ABNT NBR 8548 (1984), aplicado aos tipos de emendas mecânicas usualmente empregadas no Brasil: luvas de rosca cônica e parafusadas. Parâmetros de desempenho destes sistemas mecânicos de emenda de barras de aço, relacionados à integridade estrutural em construções de concreto armado, são avaliados com base nos resultados obtidos nestes ensaios. Pretende-se, assim, que este trabalho ofereça subsídios para discussão de procedimentos de avaliação de desempenho de luvas para emendas mecânicas de barras de aço em estruturas de concreto armado, nas futuras revisões da norma brasileira ABNT NBR 8548 (1984).

**Palavras-chave:** luva de aço; concreto armado; emenda mecânica; barra de aço.



## ABSTRACT

The use of mechanical splices to connect steel bars is an important solution in many infrastructure projects worldwide. In Brazil, this system is rarely used. The Brazilian standard on this subject is old and needs updating; particularly with regard to the test methods for performance evaluation of these splices in the laboratory. This research presents and discusses the test procedure proposed in the international standard ISO 15835 (2009) in light of the current procedure of the Brazilian Standard ABNT NBR 8548 (1984), applied to types of mechanical splices usually used in Brazil: taper threaded and bolted couplers. Performance parameters of these mechanical splicing systems related to structural integrity in reinforced concrete constructions are evaluated on the basis of the results obtained in these tests. In the end, it is intended that this paper provides subsidies for discussion of design procedures and performance evaluation in laboratory of couplers for mechanical splices of steel bars in reinforced concrete structures in future reviews of the Brazilian standard ABNT NBR 8548 (1984).

**Keywords:** coupler; reinforced concrete; mechanical splice; rebar.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1. Usina nuclear de Angra 1 (a) em construção na década de 70 e (b) no ano de 1985 logo após entrar em operação. ....	21
Figura 1-2. (a) Construção do reator da usina nuclear de Angra 2 na década de 80 e (b) vista das usinas nucleares de Angra 1, 2 e 3. ....	21
Figura 1-3. Usina hidrelétrica de Itaipu durante construção no ano de 1976 e em operação em foto de 2015. ....	22
Figura 1-4. Ilustração do complexo Parque da Cidade no município de São Paulo. ....	22
Figura 2-1. Detalhe da emenda por traspasse de barras tracionadas. ....	26
Figura 2-2. Espaçamento máximo entre duas barras emendadas por traspasse. ....	27
Figura 2-3. Emendas supostas na mesma seção transversal. ....	27
Figura 2-4. Disposição da armadura transversal nas emendas de barras (a) tracionadas e (b) comprimidas. ....	30
Figura 2-5. Emenda por solda (a) de topo por caldeamento, (b) de topo com eletrodo, (c) por traspasse e (d) com cobre-juntas. ....	31
Figura 2-6. Ilustração de uma emenda mecânica aplicada na união de uma barra de aço. ....	32
Figura 2-7. Detalhe comparativo da utilização do traspasse e das emendas mecânicas. ....	32
Figura 2-8. Luva de emenda com rosca cônica (a) padrão e (b) de posição. ....	40
Figura 2-9. Máquina para execução da rosca cônica. ....	41
Figura 2-10. Anel calibrador inserido na barra de aço. ....	41
Figura 2-11. Indicação dos “passos mínimo e máximo” do anel calibrador para controlar a qualidade da rosca. ....	41
Figura 2-12. Guia colocada sobre a rosca cônica para medir a qualidade dos frisos. ....	41
Figura 2-13. Barra de aço sendo instalada na luva de rosca cônica. ....	41
Figura 2-14. Torquímetro utilizado para torquear a luva à barra de aço. ....	42
Figura 2-15. Verificação do torque aplicado à luva e barra de aço. ....	42
Figura 2-16. Luva de emenda parafusada. ....	42
Figura 2-17. Cabeça torquimétrica cislhada. ....	42
Figura 2-18. Procedimento de instalação da luva parafusada. (a) Máquina pneumática utilizada para instalação das barras de aço nas luvas parafusadas, (b) Parafuso sendo torqueado, (c) segunda barra sendo inserida na luva e (d) vista lateral da luva parafusada e suas respectivas “cabeças” após cisalhamento. ....	43
Figura 2-19. (a) Tipologia 3, (b) Tipologia 4 e (c) Tipologia 5. ....	46
Figura 2-20. Relação momento-rotação na ligação viga-pilar. ....	47
Figura 2-21. Sistema de classificação para ligações semirrígidas. ....	48
Figura 2-22. (a) Esquema de ligação semirrígida de uma estrutura pré-moldada protendida e (b) vista em escala real do ensaio. ....	49

Figura 2-23. Estágio de análise do pilar moldado no local com armadura unida por luvas. (a) aparição das primeiras fissuras, (b) desenvolvimento de fissuras por cisalhamento, (c) extensão das fissuras e quebra do concreto, (d) reforço transversal e/ou transversal torna-se visível e (e) conjunto de danos e falha iminente da estrutura.....	50
Figura 2-24. Análise das fissuras em pilares pré-moldados em concreto após serem submetidos à simulação de abalos sísmicos.....	51
Figura 2-25. Amostra para ensaio de qualificação de emendas mecânicas.....	58
Figura 2-26. Método de ensaio para medir o deslizamento.....	59
Figura 2-27. Definição do comprimento da amostra para ensaio.....	61
Figura 2-28. Luvas (a) rosca cônica e (b) prensadas; após o ensaio realizado.....	63
Figura 2-29. Luva com cunha dupla devidamente instrumentada nos ensaios.....	64
Figura 2-30. Instrumentação da luva tipo parafusada (a) curta e (b) longa.....	65
Figura 2-31. Modelo de instrumentação com transdutores aplicados na pesquisa.....	66
Figura 2-32. Instrumentação da luva de emenda tipo parafusada (a) circular e (b) oval.....	67
Figura 2-33. Instrumentação da emenda mecânica.....	68
Figura 2-34. Instrumentação das emendas mecânicas ensaiadas.....	69
Figura 2-35. Radiografia digital realizada na amostra com diâmetro externo de (a) 47 mm e (b) 51 mm.....	70
Figura 2-36. Configuração instrumental para a realização dos ensaios.....	71
Figura 2-37. Ilustração proposta da instrumentação da luva de emenda.....	72
Figura 2-38. Luva grauteada devidamente instrumentada no equipamento universal de tração.....	72
Figura 3-1. Máquina universal de tração utilizada nos ensaios das barras de controle.....	77
Figura 3-2. Dimensão das barras de controle.....	77
Figura 3-3. Instrumentação das barras de controle. (a) Localização dos extensômetros elétricos; (b) Detalhe da aplicação dos extensômetros elétricos no centro da barra.....	77
Figura 3-4. Aquisitor de dados das leituras dos extensômetros elétricos.....	78
Figura 3-5. Imagem das leituras das deformações de uma barra de controle e dos extensômetros elétricos.....	78
Figura 3-6. Esquema dos ciclos de carga para determinação do deslizamento.....	79
Figura 3-7. Dimensões da amostra para avaliação de desempenho de emenda mecânica.....	80
Figura 3-8. Dimensão das amostras. (a) Luva de rosca cônica 20 mm; (b) Luva de rosca cônica 25 mm; (c) Luva parafusada 20 mm e (d) Luva parafusada 25 mm.....	80
Figura 3-9. Inserção dos extensômetros elétricos (a) na barra de aço e (b) na luva.....	81
Figura 3-10. Esquema de instrumentação dos Métodos 1 e 2.....	82
Figura 3-11. Fixação dos transdutores à barra e à emenda mecânica.....	82
Figura 3-12. Ponto de medição do deslizamento relativo.....	82

Figura 3-13. Transdutores de deslocamento individuais e extensômetros elétricos aplicados aos ensaios dos Métodos 1 e 2. (a) luva de rosca cônica; (b) luva parafusada. ....	83
Figura 3-14. Detalhe tridimensional do aparato desenvolvido para os ensaios utilizando o Método 3. ....	84
Figura 3-15. Esquema de instrumentação utilizado no Método 3. (a) detalhe da instrumentação; (b) ajuste da base triangular à barra de aço; (c) verificação do nível da base de aço; (d) ajuste do parafuso lateral à barra de aço; (e) parafusos pontiagudos fixando a barra de aço; (f) transdutores inseridos no bloco de plástico; (g) base de apoio para efetuar as leituras do transdutor e (h) inserção da amostra totalmente instrumentada ao equipamento de ensaio. ....	85
Figura 3-16. Instrumentação aplicada ao Método 3. (a) luva de rosca cônica; (b) luva parafusada. ....	86
Figura 3-17. Aquisitor de dados das leituras dos instrumentos de medição. ....	86
Figura 3-18. Imagem das leituras dos extensômetros elétricos e transdutores durante ensaio. ....	86
Figura 4-1. Curva tensão <i>versus</i> deformação das barras de controle de 20 mm. ....	88
Figura 4-2. Curva tensão <i>versus</i> deformação das barras de controle de 25 mm. ....	88
Figura 4-3. Detalhe da ruptura da barra de controle após ser submetido ao ensaio de resistência à tração. ....	89
Figura 4-4. Barras de controle de 20 mm após ensaio. ....	89
Figura 4-5. Barras de controle de 25 mm após ensaio. ....	89
Figura 4-6. Vista geral das amostras das luvas após a execução de todos os ensaios. ....	90
Figura 4-7. Curva força <i>versus</i> deformação – RC-20mm. ....	93
Figura 4-8. Curva força <i>versus</i> deformação – RC-25mm. ....	93
Figura 4-9. Curva força <i>versus</i> deformação – PAR-20mm. ....	94
Figura 4-10. Curva força <i>versus</i> deformação – PAR-25mm. ....	94
Figura 4-11. Compilação das deformações das amostras ensaiadas das luvas de rosca cônica e parafusadas. ....	95
Figura 4-12. Luva de emenda de rosca cônica depois de submetida à ruptura. ....	96
Figura 4-13. Luva parafusada após ruptura dos parafusos por cisalhamento. ....	97
Figura 4-14. Conjunto de amostras das luvas de rosca cônica (a) RC-20mm e (b) RC-25mm e parafusadas (c) PAR-20mm e (d) PAR-25mm após serem submetidas aos ensaios. ....	98
Figura 4-15. Evolução do deslizamento relativo entre barra e emenda mecânica tipo RC-20mm. (a) Método 1 e (b) Método 2. ....	99
Figura 4-16. Evolução do deslizamento relativo entre barra e emenda mecânica tipo RC-20mm. pelo Método 3. ....	100
Figura 4-17. Face externa da (a) luva de rosca cônica e (b) luva parafusada pós-arrancamento da barra de aço. ....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Proporção máxima de barras tracionadas emendadas.....	28
Tabela 2-2. Valores do coeficiente $\alpha_0 t$ .....	28
Tabela 2-3. Emendas mecânicas existentes e suas aplicações.....	35
Tabela 2-4. Vantagens e desvantagens das emendas utilizadas nas obras brasileiras. ....	39
Tabela 2-5. Classificação das ligações semirrígidas em estruturas pré-moldadas .....	49
Tabela 2-6. Normas técnicas vigentes que se referem aos ensaios de resistência à tração ou deslizamento. ....	54
Tabela 2-7. Comparativo entre as normas técnicas nacionais e internacionais e os valores mínimos de ensaio. ....	55
Tabela 2-8. Valores mínimos a serem obtidos nos ensaios de resistência à tração.....	57
Tabela 3-1. Planilha de orientação para instrumentação das amostras. ....	76
Tabela 3-2. Procedimentos de ensaio aplicados às barras emendadas mecanicamente.....	79
Tabela 3-3. Instrumentações aplicadas às barras emendadas mecanicamente.....	81
Tabela 4-1. Resultados dos ensaios das barras de controle.....	87
Tabela 4-2. Resultados dos ensaios em barras de aço emendadas por luva. ....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{gt}$	alongamento total da força máxima
$A_s$	armadura de continuidade negativa
$A_{st}$	área da seção transversal longitudinal
$d$	diâmetro da barra de aço
$d$	altura útil da seção resistente na ligação negativa - p.31 (ABNT NBR 9062, 2017)
$E_s$	módulo de elasticidade do aço
$F_m$	tensão máxima na ruptura
$f_{st}$	limite de resistência
$f_y$	resistência ao escoamento
$f_{yd}$	tensão de escoamento do aço
$k$	coeficiente de ajustamento da rigidez secante
$l_b$	comprimento de ancoragem básico
$l_{b,nec}$	comprimento de ancoragem necessário
$l_{0t,min}$	maior valor entre $0,3\alpha_{0t}.l_b$ , $15\phi$ e 200 mm
$l_{0c,min}$	maior valor entre $0,6.l_b$ , $15\phi$ e 200 mm
$L_{ed}$	comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade
$M$	momento fletor
$M_u$	momento fletor último
$M_E$	momento fletor na extremidade da viga
$M_R$	momento fletor de engastamento perfeito
$R_{sec}$	rigidez secante ao momento fletor da ligação viga-pilar
$\alpha_{0t}$	coeficiente função da porcentagem de barras emendadas na mesma seção
$\alpha_R$	fator de restrição à rotação
$\alpha_s$	tensão nominal do aço na armadura passiva
$\phi$	diâmetro da barra de aço
$\theta$	ângulo de rotação
$\theta_u$	ângulo de rotação último

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Histórico de aplicação da emenda mecânica no Brasil.....	20
1.2. Justificativas e Objetivos.....	22
1.3. Metodologia.....	23
1.4. Apresentação da Dissertação.....	25
2. CONCEITUAÇÃO E NORMATIZAÇÃO.....	26
2.1. Tipos de emenda de barras de aço.....	26
2.1.1. Emendas por traspasse.....	26
2.1.2. Emendas por solda.....	30
2.1.3. Emendas mecânicas por luvas de aço.....	31
2.1.3.1. Luva de rosca cônica.....	40
2.1.3.2. Luva parafusada.....	42
2.2. Situações de uso das emendas mecânicas.....	43
2.3. Utilização de emendas mecânicas em estruturas pré-moldadas de concreto.....	44
2.4. Parâmetros de desempenho da emenda mecânica.....	52
2.4.1. Resistência à tração.....	52
2.4.2. Deslizamento.....	53
2.5. Normas técnicas vigentes para ensaios de resistência à tração e deslizamento.....	54
2.5.1. Normas Brasileiras.....	57
2.5.1.1. ABNT NBR 8548 (1984).....	57
2.5.1.2. Eletrobrás Eletronuclear DS-G-6647-029202 (2011).....	59
2.5.2. Norma internacional.....	61
2.5.2.1. ISO 15835 – Part 2 (2009).....	61
2.6. Métodos de execução de ensaio e instrumentação das amostras.....	62
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	73
3.1. Detalhamento do Programa Experimental.....	73
3.1.1. Amostragem.....	74
3.1.2. Equipamentos de ensaio e instrumentos de medição.....	74
3.2. Ensaios de caracterização das barras sem emenda (barras de controle).....	76
3.2.1. Metodologia experimental.....	76
3.2.2. Instrumentação.....	77

3.3.	Ensaio s principais: barras com emendas mecânicas .....	78
3.3.1.	Metodologia experimental .....	78
3.3.2.	Instrumentação.....	80
4.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	87
4.1.	Ensaio s de caracterização das barras sem emenda (barras de controle) .....	87
4.2.	Ensaio s principais: barras com emendas mecânicas .....	90
5.	CONCLUSÕES .....	102
5.1.	Considerações gerais.....	102
5.2.	Recomendações para continuidade dos estudos .....	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
	APÊNDICE A – ENSAIO S EXPLORATÓRIOS.....	112
	APÊNDICE B - CURVAS FORÇA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO.....	118
	APÊNDICE C - CURVAS TENSÃO <i>VERSUS</i> DESLIZAMENTO .....	139



## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade é, atualmente, essencial para a sobrevivência das empresas do setor da construção civil, e o mercado precificou quanto quer pagar pelos empreendimentos. Por isso, as empresas somente conseguirão atingir margens saudáveis de rentabilidade via redução dos custos de construção (SOUZA, 2015). Na constante preocupação com o desenvolvimento da qualidade e da sustentabilidade na indústria das edificações, tem-se a questão da pesquisa e do desenvolvimento técnico.

O projeto de estruturas de concreto armado, por sua vez, é baseado em diversas premissas básicas. Entre os conceitos fundamentais em que está inserido, o reforço de uma estrutura, se necessário, seja por deficiência de materiais, execução e de manutenção ou até por mudança de uso da edificação, poderá ser especificado para resistir a qualquer tensão que possa se apresentar em uma determinada estrutura. Além disso, assume-se que a barra de aço esteja ancorada na estrutura existente e seja contínua em regiões onde a análise é procedida.

Segundo MCCABE (2000), esta afirmação simples causa desafios significativos para os projetistas. Não só a análise deve ser realizada para determinar a quantidade de aço necessária, mas os comprimentos de ancoragem necessários também devem ser computados. Em muitos casos, pode haver problemas em especificar em projeto e, principalmente, aplicar em obra todo o aço necessário dentro de uma determinada seção. Se grandes quantidades de aço estão presentes, o projetista é confrontado com um quebra-cabeça de interferência tridimensional que deve ser resolvido enquanto cumpre as exigências da norma utilizada para o espaçamento e o cobrimento.

Desde a primeira utilização do aço como reforço de uma estrutura de concreto e estudado por Thaddeus Hyatt em 1853 (SPOFFORD, 1913), os pesquisadores começaram a estudar a ligação entre o aço e o concreto, experimentalmente e analiticamente. Segundo HUA *et al.* (2013), para resolver o problema do congestionamento recorrente do traspasse, forças laterais e confinamento, várias técnicas foram estudadas para incrementar os parâmetros de resistência da emenda e reduzir o comprimento de ancoragem.

As emendas de barras de aço correspondem a regiões de comportamento complexo, onde ocorrem concentrações de tensões, as quais podem ou não mobilizar deslocamentos e esforços decorrentes dos elementos por elas ligados, fazendo com que haja uma redistribuição dos esforços ao longo da estrutura, interferindo em seu comportamento. Assim, o desempenho do sistema estrutural e o êxito nas suas aplicações estão relacionados com o desempenho das suas emendas (FERREIRA, 1999).

Estruturas resistentes à flexão devem ser construídas para resistir a esforços devido ao vento e abalos sísmicos, embora, no Brasil, estes fatores sejam raros. Em estruturas pré-moldadas, por exemplo, as ligações apresentam-se como regiões de descontinuidade que podem ou não mobilizar deslocamentos e esforços decorrentes dos elementos por elas ligados, fazendo com que haja uma redistribuição desses esforços ao longo da estrutura, interferindo no comportamento dela. Elas se localizam em regiões críticas, e a alternativa correta é se utilizar ligações que apresentem três características simultâneas fundamentais: rigidez, resistência e ductilidade.

A solidariedade entre os materiais constituintes de uma emenda, ou seja, a aderência que impede que haja deslizamento relativo aos elementos é responsável pela transferência das tensões e pela compatibilidade das deformações entre os materiais. Essa transferência de forças de tração por meio de tensões de aderência que não são uniformemente distribuídas, devido ao escorregamento em certos pontos de barra de aço, é considerada, para efeito de cálculo, uniforme. Neste aspecto, para garantir a segurança de sistemas estruturais sob condições severas, é muito importante evitar tal escorregamento das barras de aço em locais críticos da estrutura (DA SILVA, 2008).

Assim, o conhecimento do comportamento da aderência é essencial para se estabelecerem regras de dimensionamento de ancoragens e emendas das barras da armadura para cálculos dos deslizamentos, considerando a contribuição do concreto tracionado, para controle da abertura das fissuras e, portanto, para o estabelecimento da quantidade mínima de armadura.

De acordo com FUSCO (1976), as nervuras das barras de aço são elementos descontínuos de ligação. Entretanto, em virtude de seu grande número e seu pequeno afastamento relativo, admite-se hipoteticamente uma ligação contínua com características melhoradas. Essas nervuras são indispensáveis para que se possam aproveitar as resistências mais elevadas do aço, assegurando uma ligação mais efetiva e confiável. De qualquer maneira, a eficácia das barras nervuradas é maior em relação ao problema de ancoragem se comparada à fissuração.

Um estudo apresentado por JOKUBAITIS & JUKNEVICIUS (2010), sob outro aspecto, analisou as estruturas de concreto armado, cujas barras de aço foram emendadas com luvas de aço, e verificou, inclusive, que sua aplicação pode reduzir a presença de fissuras no concreto. Usualmente, as barras de aço são comercializadas com doze metros de comprimento, porém, em diversos casos, como a união de pilares e vigas de grandes

dimensões (comprimento), torna-se necessária a emenda das barras, principalmente em elementos de concreto pré-moldado. A ABNT NBR 6118 (2014) e a ACI 318 (2014), mesmo que de forma bastante simplificada, apresentam algumas possibilidades e tipos de emendas de barras de aço, que podem ser: por traspasse, por solda ou por emendas mecânicas.

Na maioria das situações em que as emendas estão envolvidas, o traspasse, geralmente, é a solução mais escolhida. Estas emendas são simples no conceito e estão diretamente relacionadas com o comprimento de desenvolvimento. Entretanto, podem ocorrer problemas significativos na aplicação deste tipo de emenda em uma determinada estrutura, mesmo que atenda a todas as exigências das normas.

A emenda de barras de aço de grandes diâmetros normalmente requer comprimentos de traspasse de grandes dimensões, requisito que não é facilmente cumprido em muitas situações. Se a emenda (traspasse) não puder ser colocada na área da seção fornecida, ou ainda, se a barra que está sendo conectada não é desenvolvida adequadamente no comprimento de emenda fornecido, então, o projetista deve verificar alternativas. As opções incluem redesenhar a emenda para fornecer confinamento adicional para reduzir seu comprimento, reposicionando a emenda por traspasse, ou mesmo mudar o diâmetro da barra.

A preferência pelo traspasse se deve também à falta de conhecimento na utilização de outros métodos de emenda ou apelo por parte de profissionais envolvidos nos projetos, além da escassez de pesquisas acadêmicas sobre o assunto. Com isso, o traspasse é a solução mais utilizada para emendar barras de aço das estruturas de concreto armado e, normalmente, seu comprimento é superior a 40 vezes o diâmetro da barra.

Este tipo de emenda é especificado por projetistas de estruturas, sobretudo, devido ao seu “baixo custo” e por estar normatizado pela ABNT NBR 6118 (2014). Entretanto, somente pode ser realizado em barras de aço com diâmetro igual ou inferior a 32 mm, além de gerar um grande congestionamento na armadura graças ao aumento da quantidade de aço utilizado e da impossibilidade de se ter um controle de qualidade adequado, uma vez que sua execução depende exclusivamente do armador.

Já as emendas soldadas podem ser executadas como emenda de topo, emenda por traspasse ou emenda com cobre-juntas, sendo preferencialmente usada a solda do tipo autógena por pressão. Apesar de serem utilizadas em diversas obras, as emendas soldadas caíram em desuso nos últimos anos, principalmente por causa da necessidade de mão-de-obra especializada, do alto custo, da baixa produtividade e do controle de qualidade bastante rigoroso.

O sistema de emendas mecânicas por luvas é um dos tipos mais eficazes para se emendar barras de aço, e constitui-se em um importante elemento para suprir as necessidades da construção civil. Apesar de esta solução ser normatizada há mais de três décadas no Brasil, sua utilização caminha lentamente e ainda carece de um choque cultural na engenharia civil nacional.

Existem, atualmente, diversos tipos de luvas para emendas mecânicas disponíveis no mercado, sendo as mais comuns: rosca cônica, rosca paralela, parafusada, prensada e soldável. Todas as soluções possuem aplicações em diversas obras de infraestrutura, porém, a maior viabilidade técnico-econômica está principalmente relacionada às de grande porte, como usinas hidrelétricas, edifícios, metrô, barragens e estruturas pré-moldadas de concreto, situações onde o traspasse não pode ser efetivamente utilizado.

Mesmo aplicadas em casos de grande repercussão, como será visto adiante, é latente, entretanto, a diferença do estágio atual de pesquisas no Brasil em relação ao restante do mundo. Poucas publicações nacionais são destinadas à avaliação de luvas como material para emenda de barras de aço, sobretudo, testadas de maneira isolada, ou seja, sem estar inserida em uma estrutura de concreto armado. Mesmo no âmbito internacional, o tema é bastante novo e somente nos últimos 20 anos as emendas mecânicas passaram a ser estudadas com mais frequência em virtude da demanda mundial por este tipo de solução em grandes obras de infraestrutura.

Assim, dentre as prioridades de pesquisa no estudo das estruturas de concreto, os métodos de emenda de barras de aço são de grande interesse, devido à facilidade de aplicação e à possível redução de custos que elas podem promover às obras de infraestrutura.

### **1.1. Histórico de aplicação da emenda mecânica no Brasil**

De acordo com informações da ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR (2012), a usina nuclear de Angra I (Figura 1-1a) é uma das primeiras obras de que se tem registro no Brasil, na qual uma emenda mecânica tipo soldável foi utilizada. Localizada no município de Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro, sua construção foi iniciada em 1972 com a concretagem da laje do prédio do reator, entrando em operação no ano de 1985 (Figura 1-1b).

Posteriormente, mas ainda na fase construtiva de Angra 1, iniciou-se a execução da usina nuclear vizinha, denominada Angra 2 (Figura 1-2a), no ano de 1981 (concluída somente no ano 2000), utilizando-se este mesmo tipo de emenda para unir as barras de aço das armaduras. A terceira usina do denominado “complexo nuclear” (Figura 1-2b), Angra 3,

ainda em fase construtiva, deixou de empregar a conexão soldável devido ao advento de novos tipos de emendas mecânicas, menos agressivas ao meio ambiente, além de mais rápidas e seguras em sua instalação (ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR, 2012).



(a)



(b)

Figura 1-1. Usina nuclear de Angra 1 (a) em construção na década de 70 e (b) no ano de 1985 logo após entrar em operação.

Fonte: ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR (2012)



(a)



(b)

Figura 1-2. (a) Construção do reator da usina nuclear de Angra 2 na década de 80 e (b) vista das usinas nucleares de Angra 1, 2 e 3.

Fonte: ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR (2012)

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é, ainda, a segunda maior do mundo em potência instalada e é um marco na história da engenharia mundial. Iniciada em 1975, quase que concomitantemente à de Angra 1, realizou-se, na época, uma grande troca de experiências entre as construtoras envolvidas em ambas as obras, decidindo-se por utilizar técnicas equivalentes de conexão de barras, de acordo com as boas práticas da engenharia disponíveis. Dentre outras técnicas, optou-se pelo mesmo sistema de conexão de barras de aço e único disponível na época: a emenda mecânica tipo soldável (ITAIPU BINACIONAL, 2015).



Figura 1-3. Usina hidrelétrica de Itaipu durante construção no ano de 1976 e em operação em foto de 2015.  
Fonte: ITAIPU BINACIONAL (2015)

Mais recentemente (década de 2010), as emendas mecânicas foram utilizadas em obras relevantes em todas as regiões do Brasil, como as usinas hidrelétricas de Belo Monte e Jirau, localizadas nos Estados do Pará e Rondônia, respectivamente, além do complexo de edifícios Parque da Cidade (Figura 1-4), no município de São Paulo, e nas estruturas do Parque Olímpico do Rio de Janeiro.



Figura 1-4. Ilustração do complexo Parque da Cidade no município de São Paulo.  
Fonte: ODEBRECHT REALIZAÇÕES IMOBILIÁRIAS (2017).

## 1.2. Justificativas e Objetivos

### Justificativas

A carência de subsídios técnicos para a especificação das emendas mecânicas ainda na fase de elaboração dos projetos estruturais, a escassez de pesquisas acadêmicas neste meio, bem como a ausência de uma norma brasileira atualizada e detalhada no que diz respeito à determinação dos parâmetros de resistência à tração e deslizamento, são as principais justificativas para elaboração desta pesquisa.

## **Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é analisar criticamente o desempenho de luvas para emendas mecânicas tipo cônica e parafusada em estruturas de concreto armado, frente ao método de ensaio proposto pela norma internacional ISO 15835 (2009), com vistas a fornecer subsídios para as futuras revisões da ABNT NBR 8548 (1984), especificamente com relação ao dimensionamento e avaliação experimental dos parâmetros de resistência à tração e deslizamento de luvas de aço, empregadas na emenda de barras de elementos em concreto armado.

Como objetivos secundários, pretende-se apresentar uma vasta revisão bibliográfica a respeito do tema, dada a escassez de publicações e pesquisas no Brasil, além de avaliar a eficiência dos métodos de ensaio e instrumentação propostos e verificar a quantidade ideal de ciclos de carga necessários para a determinação do parâmetro deslizamento.

### **1.3. Metodologia**

#### **a. Revisão da literatura**

Esta pesquisa de mestrado foi iniciada com uma revisão bibliográfica completa a respeito de parâmetros de dimensionamento e de avaliação do comportamento em laboratório de luvas de aço empregadas na emenda das armaduras em elementos de concreto armado. Normatizações, artigos científicos, dissertações e teses, sendo todos os materiais pesquisados no âmbito nacional e internacional, foram a base desta revisão bibliográfica sobre o assunto. Nesta etapa, foram identificadas as lacunas de conhecimento ainda existentes em procedimentos nacionais de dimensionamento e de avaliação experimental, de maneira isolada, das emendas de barras de aço com o emprego de luvas.

#### **b. Definição das emendas mecânicas a serem estudadas**

Por meio da revisão da literatura, foi possível obter conhecimentos teóricos sobre todos os tipos de emendas de barras de aço existentes no mercado mundial. A partir daí, realizou-se um estudo minucioso a despeito dos métodos de emenda mecânica utilizados nas obras de infraestrutura no Brasil. Assim, elegeram-se para os ensaios as luvas de rosca cônica e parafusada. Ambos os tipos foram submetidos a ensaios de resistência à tração e deslizamento, todos baseados na normatização nacional ABNT NBR 8548 (1984) e internacional ISO 15835 (2009).

### **c. Programa experimental**

A investigação experimental na presente pesquisa foi dividida em duas fases, sendo a primeira delas a caracterização das barras de controle, e a segunda fase baseada nos resultados de uma série de ensaios de resistência à tração e deslizamento que foram realizados em luva de rosca cônica e parafusadas, disponíveis em vasta referência bibliográfica obtida na revisão de literatura mencionada anteriormente. O programa experimental descreve todo o detalhamento e os objetivos, incluindo a descrição das amostras, as características dos materiais empregados e a instrumentação utilizada, além das metodologias de ensaio, resultados experimentais e análises.

Com isso posto, definiu-se uma metodologia preliminar teórica e experimental baseada na norma brasileira vigente para emendas mecânicas, ABNT NBR 8548 (1984) para resistência à tração, e no documento DS-G-6647-029202 (2011) para o deslizamento, a fim de comparar ambas às propostas na norma internacional ISO 15835 (2009). A instrumentação foi baseada nos estudos feitos por HABER *et al.* (2015) e NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015).

### **d. Resultados experimentais e análises**

As análises dos resultados obtidos nos ensaios foram procedidas com base no comparativo entre os métodos de ensaio propostos para a determinação dos parâmetros de resistência à tração e deslizamento, além da instrumentação utilizada. Apresentam-se as curvas tensão *versus* deslizamento a fim de ilustrar o comportamento dos transdutores na determinação do parâmetro de deslizamento e a curva força *versus* deformação, com o objetivo de avaliar e comparar as deformações nas barras e luvas de aço.

### **e. Conclusões**

Finalmente, apresentam-se as discussões gerais deste trabalho com vistas à metodologia proposta e aos resultados alcançados, além de sugestões para trabalhos futuros.



#### **1.4. Apresentação da Dissertação**

A ordem e os conteúdos dos capítulos que constituem a presente dissertação versam sobre:

**Capítulo 1** – Introdução: Discute a importância do estudo de emenda de barras de aço, histórico de aplicação no Brasil em obras de infraestrutura, os objetivos da dissertação e um resumo da metodologia empregada.

**Capítulo 2** – Conceituação e normatização: Apresentação dos principais conceitos relacionados à emenda de barras de aço, incluindo as emendas por traspasse e por solda, além de todos os tipos de emendas mecânicas e suas respectivas características disponíveis no Brasil e no mundo, detalhando, principalmente, as luvas ensaiadas nesta pesquisa. Também são apresentados neste capítulo os principais parâmetros das emendas mecânicas consideradas nos projetos estruturais, as normatizações brasileiras e internacionais, além de uma descrição detalhada das principais metodologias de ensaio e uma extensa referência de pesquisas nas quais as emendas mecânicas foram relevantes.

**Capítulo 3** – Programa Experimental: Descreve o detalhamento do programa, a amostragem proposta, os equipamentos utilizados e a metodologia aplicada nos ensaios de caracterização das barras de controle e das barras emendadas, descrevendo, inclusive, a instrumentação utilizada em cada método.

**Capítulo 4** – Resultados e análises: São apresentados neste capítulo, dentro da abordagem experimental, os resultados dos ensaios de caracterização das barras de controle e das barras emendadas. Ao final, são apresentadas comparações dos resultados com os valores dos parâmetros analisados obtidos nos ensaios.

**Capítulo 5** – Conclusões: São apresentadas as considerações gerais desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. CONCEITUAÇÃO E NORMATIZAÇÃO

### 2.1. Tipos de emenda de barras de aço

#### 2.1.1. Emendas por traspasse

A emenda por traspasse é a solução mais utilizada para emendar barras de aço das estruturas de concreto armado e consiste em uma simples justaposição longitudinal das barras num comprimento de emenda bem definido (Figura 2-1). Usualmente, o comprimento mínimo de justaposição é 40 vezes o diâmetro da barra e é especificado por projetistas de estruturas por ser o método menos dispendioso em comparação com os outros existentes. Entretanto, de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), este tipo de emenda não é permitido para barras de bitola maior que 32 mm e cuidados especiais devem ser tomados na ancoragem e na armadura de costura dos tirantes e pendurais elementos estruturais lineares de seção inteiramente tracionada.

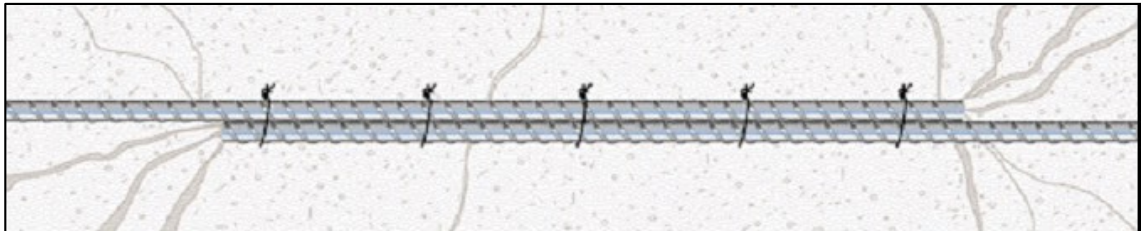


Figura 2-1. Detalhe da emenda por traspasse de barras tracionadas.  
Fonte: LENTON (2011)

Apesar de já ser uma solução consagrada em qualquer tipo de obra no Brasil e no mundo, a emenda por traspasse normalmente gera um grande congestionamento na armadura, em uma determinada seção, devido ao aumento da quantidade de aço utilizado. Este tipo de emenda normalmente também impossibilita o controle adequado de qualidade devido a sua execução depender exclusivamente do armador, além de ser um método de emenda muito complicado de se instrumentar experimentalmente em laboratório.

As barras a serem emendadas devem ficar próximas entre si, numa distância não superior a  $4\phi$ , como mostrado na Figura 2-2. Barras com saliências podem ficar em contato direto, dado que elas mobilizam o concreto para a transferência da força. O padrão de fissuração na ruptura de emendas depende do cobrimento de concreto nas duas direções. A ruptura do cobrimento na região da emenda depende do espaçamento entre elas. Sua resistência depende do comprimento de traspasse, do diâmetro e espaçamento das barras e da resistência do concreto. O aumento do comprimento de traspasse não aumenta a resistência da emenda na mesma proporção.

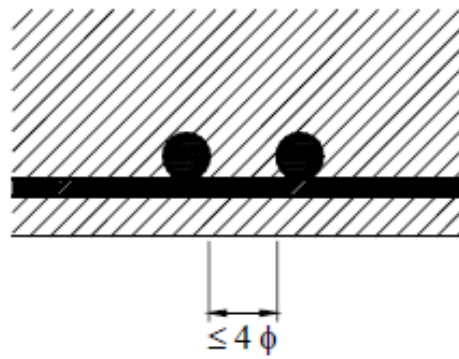


Figura 2-2. Espaçamento máximo entre duas barras emendadas por traspasse.  
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

### ➤ Proporção das barras emendadas

Consideram-se como na mesma seção transversal, as emendas que se superpõem ou cujas extremidades mais próximas estejam afastadas em menos de 20% do comprimento do trecho de traspasse, como ilustrado na Figura 2-3 (ABNT NBR 6118, 2014). Quando as barras possuem diâmetros diferentes, o comprimento de traspasse deve ser calculado pela barra de maior diâmetro.

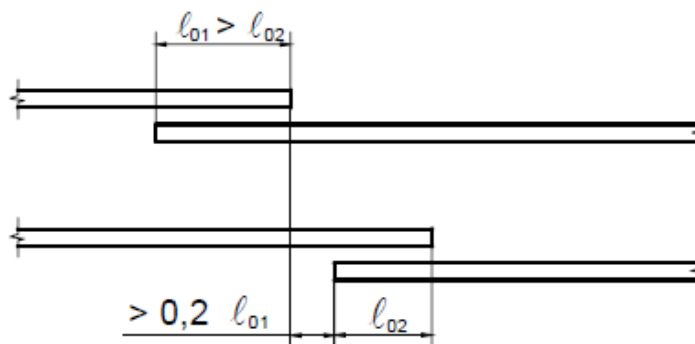


Figura 2-3. Emendas supostas na mesma seção transversal.  
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

A proporção máxima de barras tracionadas da armadura principal emendadas por traspasse na mesma seção transversal do elemento estrutural está indicada na Tabela 2-1. A adoção de proporções maiores que as indicadas devem ser justificadas quanto à integridade do concreto na transmissão das forças e à capacidade resistente da emenda, como um conjunto, frente à natureza das ações que a solicitem. Quando se tratar de armadura permanentemente comprimida ou de distribuição, todas as barras podem ser emendadas na mesma seção transversal.

Tabela 2-1. Proporção máxima de barras tracionadas emendadas.  
 Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Tipo de barra	Situação	Tipo de carregamento	
		Estático	Dinâmico
Alta aderência	Em uma camada	100%	100%
	Em mais de uma camada	50%	50%
Lisa	$\phi < 16$ mm	50%	25%
	$\phi \geq 16$ mm	25%	25%

➤ **Comprimento de traspasse de barras tracionadas isoladas**

Quando a distância livre entre barras emendadas estiver compreendida entre 0 e  $4\phi$ , o comprimento do trecho de traspasse para barras tracionadas é calculado por meio da Equação 1. Quando a distância livre entre barras emendadas for maior que  $4\phi$  ao comprimento calculado pela Equação 1, deve ser acrescida a distância livre entre as barras emendadas.

$$l_{ot} = \alpha_{ot} \cdot l_{b,nec} \geq l_{oc,min} \quad (1)$$

Onde:

$l_{ot,min}$  = maior valor entre  $0,3\alpha_{ot} \cdot l_b$ ,  $15\phi$  e 200 mm.

$l_{b,nec}$  = comprimento de ancoragem necessário, conforme item 5.1 da ABNT NBR 6118 (2014).

$\alpha_{ot}$  = é o coeficiente função da porcentagem de barras emendadas na mesma seção, conforme Tabela 2-2.

Tabela 2-2. Valores do coeficiente  $\alpha_{ot}$ .  
 Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Barras emendadas na mesma seção	$\leq 20$	25	33	50	$>50$
Coeficiente $\alpha_{ot}$	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00

➤ **Comprimento de traspasse de barras comprimidas isoladas**

Nas emendas de barras de aço à compressão existe o efeito favorável da ponta da barra e, por este motivo, o comprimento da emenda não é majorado como no caso de emendas de barras tracionadas. Quando as barras estiverem comprimidas, como ocorre normalmente com as barras longitudinais dos pilares, adota-se a Equação 2 para o cálculo do comprimento de traspasse:

$$l_{oc} = l_{b,nec} \geq l_{oc,mín} \quad (2)$$

Onde:

$l_{oc,mín}$  = maior valor entre  $0,6 l_b$ ,  $15\phi$  e 200 mm.

$l_{b,nec}$  = comprimento de ancoragem necessário, conforme item 5.1 da ABNT NBR 6118 (2014).

$l_b$  = comprimento de ancoragem básico, como definido no item 5.1 da ABNT NBR 6118 (2014).

### ➤ **Armadura transversal nas emendas por traspasse em barras isoladas**

Com o objetivo de combater as tensões transversais de tração, as quais podem originar fissuras na região da emenda, a ABNT NBR 6118 (2014) recomenda a adoção de armadura transversal a esta, em função de serem barras tracionadas, comprimidas ou fazer parte de armadura secundária.

#### ▪ **Armadura transversal tracionada**

Quando o diâmetro da barra de aço for inferior a 16 mm ou a proporção de barras emendadas na mesma seção for menor que 25%, a área da armadura transversal deve resistir a 25% da força longitudinal atuante na barra. Nos casos em que o diâmetro da barra for igual ou superior a 16 mm ou, quando a proporção de barras emendadas na mesma seção for maior ou igual a 25%, a armadura transversal deve estar de acordo com a Figura 2-4a e ainda:

- Ser capaz de resistir a uma força igual à de uma barra emendada, considerando os ramos paralelos ao plano da emenda;
- Ser constituída por barras fechadas se a distância entre as duas barras mais próximas de duas emendas na mesma seção for inferior a  $10\phi$ ;
- Concentrar-se nos terços extremos da emenda.

#### ▪ **Armadura transversal comprimida**

A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece ainda que, para a armadura transversal comprimida, devem ser mantidos os critérios estabelecidos para o caso de armadura principal tracionada, com pelo menos uma barra de armadura transversal posicionada  $4\phi$ , além das extremidades da emenda, conforme mostrado na Figura 2-4b.

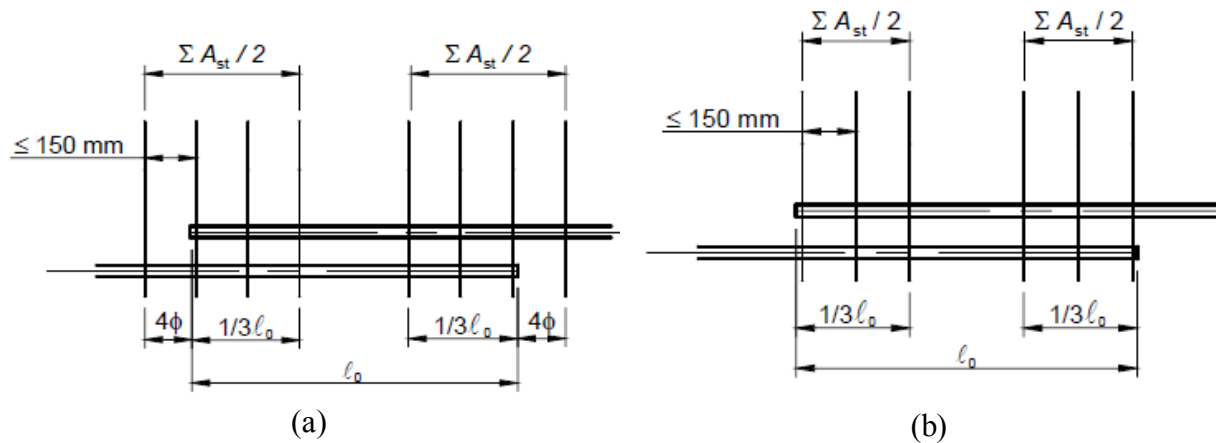


Figura 2-4. Disposição da armadura transversal nas emendas de barras (a) tracionadas e (b) comprimidas.  
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

### 2.1.2. Emendas por solda

Apesar de terem sido muito utilizadas no Brasil em tempos passados, as emendas de barras de aço por solda são as menos utilizadas atualmente, pois podem apresentar mais desvantagens que vantagens. Apesar do baixo custo do material e a possibilidade de emendar barras de qualquer diâmetro, a aplicação depende 100% do soldador, pois existe a necessidade de mão-de-obra qualificada e especializada. Além disso, a produtividade de aplicação é muito baixa e o controle de qualidade e inspeção, oneroso. De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), as emendas por solda podem ser:

- De topo, por caldeamento, para bitola não menor que 10 mm (Figura 2-5a);
- De topo, com eletrodo, para bitola não menor que 20 mm (Figura 2-5b);
- Por traspasse, com pelo menos dois cordões de solda longitudinais, cada um deles com comprimento não inferior a  $5\phi$ , afastados no mínimo  $5\phi$  (Figura 2-5c);
- Com outras barras justapostas (cobrejuntas), com cordões de solda longitudinais, fazendo-se coincidir o eixo baricêntrico do conjunto com o eixo longitudinal das barras emendadas, devendo cada cordão ter comprimento de pelo menos  $5\phi$  (Figura 2-5d).

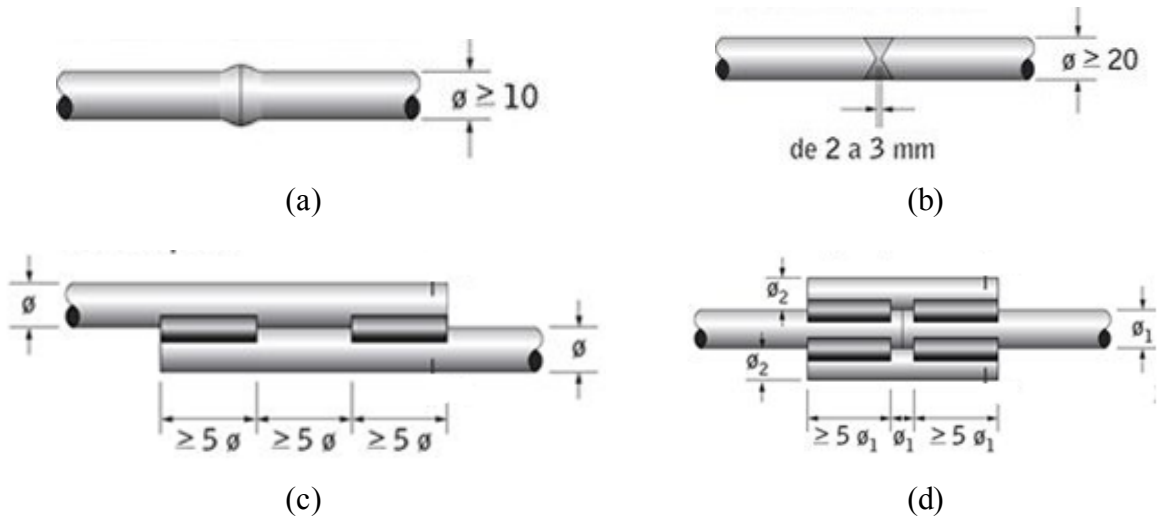


Figura 2-5. Emenda por solda (a) de topo por caldeamento, (b) de topo comeletrado, (c) por traspasse e (d) com cobre-juntas.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

As emendas por solda podem ser realizadas na totalidade das barras em uma seção transversal do elemento estrutural. Devem ser consideradas como na mesma seção as emendas que de centro a centro estejam afastadas entre si menos que  $15\phi$ , medidos na direção do eixo da barra. A resistência de cada barra emendada deve ser considerada sem redução e em caso de barra tracionada, além de preponderância de carga acidental, a resistência deve ser reduzida em 20%. Para emendas soldadas, sua resistência deve atender aos requisitos de normas específicas, como o caso da ABNT NBR 6118 (2014). Na ausência desses, a resistência deve ser no mínimo 15% maior que a resistência de escoamento da barra a ser emendada, obtida em ensaio isolado.

### 2.1.3. Emendas mecânicas por luvas de aço

O sistema de emendas mecânicas por luvas (Figura 2-6) é reconhecidamente a maneira mais eficaz para se emendar barras de aço e constitui-se em importante elemento para suprir as necessidades da construção civil. Além disso, sabe-se que historicamente são economicamente viáveis para unir barras com diâmetro igual ou superior a 12 mm, principalmente se comparadas aos métodos de emenda por traspasse ou por solda. A ilustração da Figura 2-7 detalha um comparativo entre o traspasse e as emendas mecânicas com relação ao congestionamento das barras em uma conexão estrutural pilar-viga.

Os tipos de emenda mecânica disponíveis nos mercados brasileiro e mundial foram desenvolvidos por inúmeras empresas, sendo que cada tipo possui sua característica própria e normalmente necessitam de estudos e técnicas avançadas de projeto e fabricação,

apesar de realizarem a mesma função. Além disso, há uma quantidade de informação limitada a respeito dos mecanismos resistentes à carga a que as emendas são submetidas, da distribuição das tensões internas e dos cálculos estruturais necessários, com exceção feita a relatórios de ensaios disponibilizados de cada solução que está sendo utilizada em um determinado projeto.

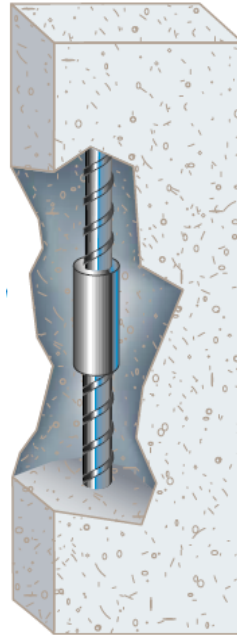


Figura 2-6. Ilustração de uma emenda mecânica aplicada na união de uma barra de aço.  
Fonte: LENTON (2011).

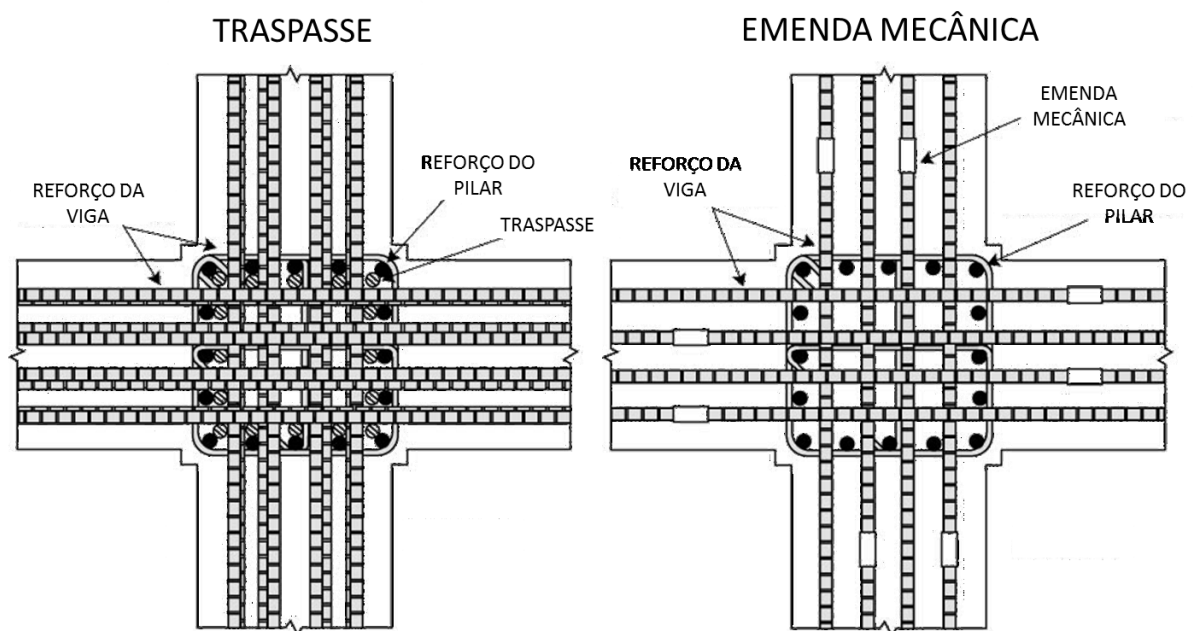


Figura 2-7. Detalhe comparativo da utilização do traspasse e das emendas mecânicas.  
Fonte: Autor



Como principais vantagens da utilização das emendas mecânicas estão as seguintes:

- Redução dos problemas de congestionamento na armadura;
- Melhoria da continuidade estrutural entre as barras, gerando maior segurança;
- Redução de mão-de-obra e consequentemente do custo global da estrutura;
- Instalação simples e rápida;
- Controle da propagação das fissuras no concreto;
- Possibilidade de união de barras de qualquer comprimento e diâmetro;
- Excelente resistência à tração e ductilidade sob ações estáticas;
- Ótimo desempenho sob ação cíclica de cargas.

Todas as emendas mecânicas possuem características particulares, sejam elas dos componentes da emenda ou do equipamento necessário para instalação e/ou procedimento, que possa influenciar o desenvolvimento do projeto ou construção. A seleção do tipo de emenda, componentes, requisitos de instalação, custo e opções disponíveis devem ser consideradas ainda no processo de elaboração do projeto. Uma variedade de emendas mecânicas está disponível no mercado atualmente. No entanto, poucas delas são efetivamente fabricadas no Brasil.

Devido aos requisitos de resistência mínimos de uma emenda, geralmente assume-se na fase de projeto que a presença de uma emenda mecânica ou duas barras de reforço não resulta na redução da resistência estrutural, rigidez ou ductilidade do aço de reforço. As normas regulamentadoras de projeto cobrem os requisitos para emendas soldáveis ou mecânicas, mas geralmente não especificam como evitar fragilidades potenciais que possam ser diretamente atribuídas aos detalhes específicos ou materiais de uma emenda mecânica.

Os desenhos de projeto e especificações devem definir claramente o(s) tipo(s) de emenda, localizações e requisitos técnicos (por exemplo, emenda por traspasse *versus* emenda mecânica, emenda resistente somente aos esforços de tração *versus* emenda resistente a esforços de tração e compressão), bem como os respectivos métodos de instalação. Os projetos devem, ainda, definir as especificações dos tipos de emenda e as opções disponíveis no mercado, bem como considerar a construtibilidade individual de cada uma.

A Tabela 2-3 resume os tipos de emendas mecânicas existentes e suas respectivas aplicações de acordo com a ACI 439.3R-7 (2007). Como citado anteriormente, a ABNT NBR

8548 (1984) e ABNT NBR 6118 (2014) pouco detalham os tipos de emenda disponíveis no Brasil, tanto em relação às suas características técnicas como em detalhes de projeto.

1. **Resistentes aos esforços de compressão:** a tensão é transferida através de cargas verticais concêntricas de uma barra à outra. Atualmente, apenas um dispositivo de emenda por compressão está disponível comercialmente.
2. **Resistentes aos esforços de tração e compressão:** por ser o tipo de conexão mais especificada e aplicada em grandes obras, as emendas mecânicas resistentes tanto a esforços de tração quanto compressão, e possuem diversos tipos disponíveis comercialmente, sendo dois deles objetos de estudo desta pesquisa.
3. **Para futuras continuidades:** são utilizadas em juntas de construção com a finalidade de transferir cargas de tensão ou compressão (ou ambas), ao longo da conexão entre as barras de reforço. Também conhecidas como emendas flangeadas, possuem, em geral, pequenas placas de aço que permitem fixar suas laterais à forma, cuja vantagem é permitir a continuidade dos reforços ao longo das juntas de construção sem a necessidade de perfurar tais formas.
4. **De traspasse:** normalmente utilizados em situações em que o reforço é necessário apenas para conter esforços de tração, especialmente em pisos e lajes, e também são capazes de transferir cargas de compressão. Tais emendas são usadas para conectar positivamente barras de reforço numa configuração de sobreposição, sendo adequada para aplicações de reparo de estruturas de concreto existentes devido ao uso significativamente menor de concreto necessário para o reforço.

Tabela 2-3. Emendas mecânicas existentes e suas aplicações.  
 Fonte: ACI 439.3R-7 (2007)

Luva de emenda	Tipo	Diâmetro (mm)	Aplicação				
			A	B	C	D	E
Cinta de aço  LENTON (2011)	1	22 a 36	✓	✗	✓	✗	✗
Soldável  LENTON (2011)	2	12,5 a 57	✓	✗	✓	✓	✗
Prensada  RUDLOFF (2011)	2	10 a 57	✓	✓	✓	✓	✓

A – instalação em obra; B – estruturas pré-moldadas de concreto; C – nova construção; D - reparo de estruturas; E – pré-instalação ou oficinas de corte e dobra.

Tabela 2-3. Emendas mecânicas existentes e suas aplicações (continua)  
 Fonte: ACI 439.3R-7 (2007)

Prensada e rosqueada	 BAR SPLICE (2010)	2	10 a 57					
Prensada e rosqueada com parafuso	 BAR SPLICE (2010)	2	12,5 a 57					
Grauteada com rosca cônica	 LENTON (2011)	2	16 a 57					
Grauteada longa	 NMB SPLICE SLEEVE (2013)	2	16 a 57					



A – instalação em obra; B – estruturas pré-moldadas de concreto; C – nova construção; D - reparo de estruturas; E – pré-instalação ou oficinas de corte e dobra.

Tabela 2-3. Emendas mecânicas existentes e suas aplicações (continua)  
 Fonte: ACI 439.3R-7 (2007)

Parafusada	 <p>LENTON (2011)</p>	2	12,5 a 57	✓	✓	✓	✓	✗
Rosca cônica	 <p>LENTON (2011)</p>	2	10 a 57	✓	✓	✓	✗	✓
Rosca paralela	 <p>ANCON (2011)</p>	2	12,5 a 57	✓	✓	✓	✗	✓

A – instalação em obra; B – estruturas pré-moldadas de concreto; C – nova construção; D - reparo de estruturas; E – pré-instalação ou oficinas de corte e dobra.

Tabela 2-3. Emendas mecânicas existentes e suas aplicações (continua)  
 Fonte: ACI 439.3R-7 (2007)

Com rosca para futuras continuidades	 LENTON (2011)	3	12,5 a 57	✓	✗	✓	✓	✗
Pino central	 LENTON (2011)	4	12,5 a 20	✓	✗	✓	✓	✗

A – instalação em obra; B – estruturas pré-moldadas de concreto; C – nova construção; D - reparo de estruturas; E – pré-instalação ou oficinas de corte e dobra.

O objetivo abordado nesse trabalho limita-se às emendas mecânicas de rosca cônica e parafusada, cuja escolha se deu pelo uso recente no Brasil e por serem, atualmente, dois dos tipos mais especificados em projetos estruturais como solução para emendas mecânicas de barras de aço das estruturas de concreto armado em todo o mundo. Entretanto, é apresentado na Tabela 2-4 um comparativo entre as duas emendas estudadas e outros três tipos disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 2-4. Vantagens e desvantagens das emendas utilizadas nas obras brasileiras.

Fonte: Autor

<b>Luva para Emenda Mecânica</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Rosca Cônica</b>	Custo semelhante ao do traspasse Fácil execução Excelente produtividade Autoalinhamento Controle de qualidade por meio de torquímetro Equipamento específico para execução das roscas	Necessidade de preparação das pontas da barra de aço Não é possível executar a rosca em barras já instaladas Necessidade de uma luva de posicionamento para utilização em barras dobradas
<b>Parafusada</b>	Não requer preparação das pontas da barra de aço Utilizadas em situações emergenciais onde a barra já esteja instalada no local Instalação rápida e fácil Excelente produtividade Controle de qualidade visual (parafuso cisalha quando alcança o torque especificado)	Alto custo Dificuldade na emenda de barras dobradas
<b>Prensada</b>	Não requer preparação das pontas da barra de aço Possibilidade de execução em barras já instaladas Custo semelhante ao do traspasse	Equipamento de prensa muito pesado para instalação em grandes alturas Dificuldade na inspeção e controle de qualidade Baixa produtividade
<b>Rosca Paralela</b>	Custo semelhante ao do traspasse Boa produtividade Equipamento específico para execução das roscas	Necessidade de preparação das pontas da barra de aço Não é possível executar a rosca em barras já instaladas Controle de qualidade visual Dificuldade no alinhamento das barras durante instalação
<b>Soldável</b>	Não requer preparação das pontas da barra de aço Baixo custo	Difícil execução Baixa produtividade Necessidade de mão-de-obra especializada Controle de qualidade oneroso

### 2.1.3.1. Luva de rosca cônica

Utilizada no Brasil desde a década de 90, a luva de rosca cônica (Figura 2-8a) vem sendo utilizada com frequência no Brasil em obras de edifícios, usinas hidrelétricas e elementos pré-moldados, principalmente devido ao seu custo ser compatível com as emendas tradicionais por traspasse.

Este tipo de luva é fabricado com rosca cônica em ambas as extremidades, criando uma junção mecânica para duas seções de barras aço e foi concebida para ser usada quando ambas as barras podem girar. Como mesma configuração de rosca, as luvas de transição são utilizadas para unir barras de diferentes diâmetros, enquanto que a luva de posição (Figura 2-8b) é especificada em situações onde pelo menos uma das barras não está livre para girar.



Figura 2-8. Luva de emenda com rosca cônica (a) padrão e (b) de posição.  
Fonte: LENTON (2011)

A grande vantagem em se utilizar uma luva de emenda com rosca cônica é a grande facilidade de alinhamento, principalmente quando aplicada em grandes alturas. Normalmente, a rosca é fabricada no local ou em oficinas de corte e dobra, utilizando uma máquina rosqueadeira (Figura 2-9) especialmente desenvolvida para tal fim. Para que o controle de qualidade seja realmente atribuído a esta solução, a utilização de um torquímetro é indispensável.

Para assegurar que o comprimento da rosca esteja na dimensão adequada, após sua execução, utiliza-se um medidor chamado “anel calibrador” (Figura 2-10), cujas dimensões são variadas a depender do diâmetro da barra de aço. O medidor é inserido sobre as pontas de todas as barras que, após roscadas, devem estar dentro dos limites indicados nesta peça de acordo com o “passo mínimo” ou “passo máximo” ilustrado na Figura 2-11.

Após a execução das roscas, a qualidade dos “frisos” é aferida com o auxílio de uma guia sem uso denominada “cossinete” (Figura 2-12), peça utilizada para a fabricação das



rosca e instalada dentro da máquina rosqueadeira. Posteriormente, a barra de aço é inserida na luva (Figura 2-13) e recebe o torque especificado pelo fabricante, cujo valor é variável a depender do diâmetro da barra de aço.



Figura 2-9. Máquina para execução da rosca cônica  
Fonte: LENTON (2011)



Figura 2-10. Anel calibrador inserido na barra de aço.  
Fonte: Autor

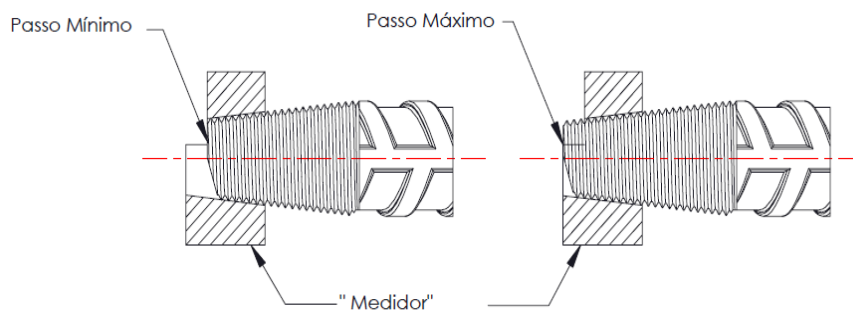


Figura 2-11. Indicação dos “passos mínimo e máximo” do anel calibrador para controlar a qualidade da rosca.  
Fonte: LENTON (2011)



Figura 2-12. Guia colocada sobre a rosca cônica para medir a qualidade dos frisos.  
Fonte: Autor



Figura 2-13. Barra de aço sendo instalada na luva de rosca cônica.  
Fonte: Autor



Figura 2-14. Torquímetro utilizado para torqu岸ar a luva à barra de aço.  
Fonte: LENTON (2011)



Figura 2-15. Verificação do torque aplicado à luva e barra de aço.  
Fonte: Autor

### 2.1.3.2. Luva parafusada

Composta por parafusos torquimétricos que permitem utilizar a força integral da barra de aço e melhorar a integridade estrutural tanto em tensão quanto em compressão, a emenda mecânica por luva parafusada (Figura 2-16) está sendo utilizada com frequência no Brasil, apesar do alto custo, principalmente em situações emergenciais, onde as luvas ditas convencionais não podem ser empregadas. Ela foi projetada para uso em pilares, pontes, elementos pré-moldados e vigas; e sua instalação normalmente é realizada com uma chave comum ou de impacto, dependendo de sua dimensão e diâmetro, pois o cisalhamento da cabeça do parafuso ocorrerá quando o torque especificado for alcançado, permitindo total inspeção visual (Figura 2-17).



Figura 2-16. Luva de emenda parafusada  
Fonte: LENTON (2011)



Figura 2-17. Cabeça torquimétrica cisalhada  
Fonte: LENTON (2011).

Neste caso, as barras de aço conectadas por uma luva parafusada não necessitam de preparação em suas pontas, o que permite uma instalação mais simples e rápida, se

comparada com as luvas de rosca cônica. Para isso, utiliza-se uma máquina pneumática para apertar os parafusos da luva até que estes atinjam o torque especificado pelo fabricante, cisalhando suas “cabeças” após tal alcance. Os parafusos são, então, torquoados em ambas as extremidades da luva, um a um, do centro da luva às suas pontas. Para as luvas parafusadas de 20 mm, o torque máximo especificado é 205 N.m, enquanto que para a luva de 25 mm o torque é 475 N.m. A sequência da Figura 2-18 ilustra o procedimento de instalação da luva parafusada.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2-18. Procedimento de instalação da luva parafusada. (a) Máquina pneumática utilizada para instalação das barras de aço nas luvas parafusadas, (b) Parafuso sendo torquoadado, (c) segunda barra sendo inserida na luva e (d) vista lateral da luva parafusada e suas respectivas “cabeças” após cisalhamento.

Fonte: Autor

## 2.2. Situações de uso das emendas mecânicas

Há inúmeras situações que condicionam o uso de emendas mecânicas ou que fazem sua incorporação mais prática e econômica do que as emendas por traspasse ou por solda, sendo algumas das condições mais comuns descritas abaixo.

- a. Quando há situações de conexão em barras de diâmetro superior a 32 mm, onde a emenda por traspasse não pode ser usada (ABNT NBR 6118, 2014);
- b. Onde o espaçamento entre barras de aço for insuficiente para permitir a aplicação da emenda tradicional das barras, fato que ocorre geralmente em situações em que se requer uma quantidade maior de reforços e o uso de barras maiores;
- c. Quando os requisitos das normas regulamentadoras para emenda tradicional resultam em um traspasse de grande dimensão;
- d. Quando o local das conexões e provisões para construções futuras preveem a utilização de emendas mecânicas para promover continuidade dos esforços de tração;
- e. Para que haja redução do congestionamento da armadura, a fim de satisfazer a proporção máxima de 8% em pilares reforçados, pois ao utilizar emendas mecânicas em substituição ao traspasse, a quantidade de aço longitudinal pode ser significativamente reduzida na região da conexão, além de criar a possibilidade de diminuir a seção do pilar;
- f. Quando a estrutura de concreto necessitar de reparo e novas barras de reforço forem inseridas àquelas já instaladas, a emenda mecânica requer menos remoção de concreto em comparação com a emenda tradicional por traspasse;
- g. Quando a estrutura estiver sujeita a deformações inelásticas devido a ações sísmicas, pois a capacidade de resistência estabelecida na ACI 318 (2014) é mais elevada para emendas mecânicas do que para emendas por traspasse. As emendas mecânicas caracterizadas como Tipo 2 são qualificadas pelos rigorosos ensaios de resistência à tração e deslizamento.

### **2.3. Utilização de emendas mecânicas em estruturas pré-moldadas de concreto**

As estruturas de concreto pré-moldado caracterizam-se por apresentar facilidade de execução e de controle de qualidade. Por outro lado, a necessidade de realizar as ligações<sup>1</sup> entre os elementos constitui um dos principais problemas a serem enfrentados no seu emprego. Em geral, as ligações são as partes mais importantes no projeto das estruturas de concreto pré-moldado, sendo de fundamental importância tanto para a produção como para o comportamento da estrutura finalizada.

---

<sup>1</sup> Termo utilizado para estruturas pré-moldadas de concreto e que engloba não somente as emendas das barras, mas também a união e posicionamento das peças.

Tem sido necessária a verificação do comportamento das emendas na análise estrutural devido ao aumento da complexidade dos cálculos e também insuficiência de dados confiáveis. Devido ao seu comportamento próprio, as emendas promovem a redistribuição dos esforços dos elementos e, ainda, a modificação dos deslocamentos finais. É fato que as falhas de certas ligações, frente a determinadas ações, podem provocar, por exemplo, o colapso da estrutura, mesmo que parcial. Os defeitos em sua execução podem ainda originar esforços que provoquem falhas ou deslocamentos excessivos. O equacionamento dos fatores que interferem no comportamento de uma determinada ligação favorece o planejamento de futuros estudos experimentais e ainda se mostra de grande utilidade no desenvolvimento de critérios de dimensionamento e detalhamento da referida ligação (FERREIRA, 1993).

De acordo com EL DEBS (2017), as ligações mais simples normalmente acarretam em estruturas mais solicitadas aos momentos fletores. Em contrapartida, ligações que tendem a reproduzir o comportamento das estruturas moldadas no local, pela transmissão dos momentos fletores entre os elementos, requerem mais trabalho, reduzindo, em partes, as vantagens do concreto pré-moldado. As dificuldades da execução deste último tipo de ligação são devidas às necessidades de fazer a ligação tanto do concreto quanto do aço, pelo fato de o concreto armado ser um material composto, de ter que acomodar as tolerâncias que intervêm nas várias fases e, ainda, pelo fato de o concreto ser um material relativamente frágil.

As ligações têm recebido uma abordagem distinta das principais entidades que promovem o concreto pré-moldado, o PCI (*Prestressed/Precast Concrete Institute*) e a Comissão 6 da *fib* (*International Federation for Structural Concrete*). O PCI tem uma publicação específica sobre o assunto, o manual de ligações (PCI, 2008), que mostra ligações típicas, com algumas indicações de cálculo, sendo a parte conceitual exibida no seu manual de concreto pré-moldado (PCI, 2010). Já a Comissão 6 da *fib* apresenta uma forte conceituação do assunto no boletim 43 (*fib*, 2008), mas não tem uma publicação sobre ligações típicas.

Apesar de não ser objeto desta pesquisa enumerar os métodos de ligação de elementos pré-moldados de concreto com luvas de aço, vale ressaltar que eles vêm sendo estudados no Brasil há 25 anos. Neste âmbito, diversas pesquisas foram realizadas, sendo as publicadas por FERREIRA (1993), BALLARIN (1993), FERREIRA (1999), SOUZA (2006), CATOIA (2007) e JEREMIAS JUNIOR (2007) referências na literatura técnica brasileira.

A recém-publicada ABNT NBR 9062 (2017) detalha as ligações viga-pilar típicas de seção composta com solidarização no local, podem ser realizadas com continuidade da armadura negativa por meio de bainhas corrugadas passando no pilar, preenchidas com graute, ou por meio de luvas inseridas no pilar. Na Figura 2-19 são apresentadas as tipologias

referenciadas na ABNT NBR 9062 (2017) para a determinação do comprimento efetivo de deformação,  $L_{ed}$ , para o cálculo da rigidez secante negativa em ligações viga-pilar típica e que sugerem a especificação de luvas rosqueadas atuando como elemento de ligação dos elementos pré-moldados.

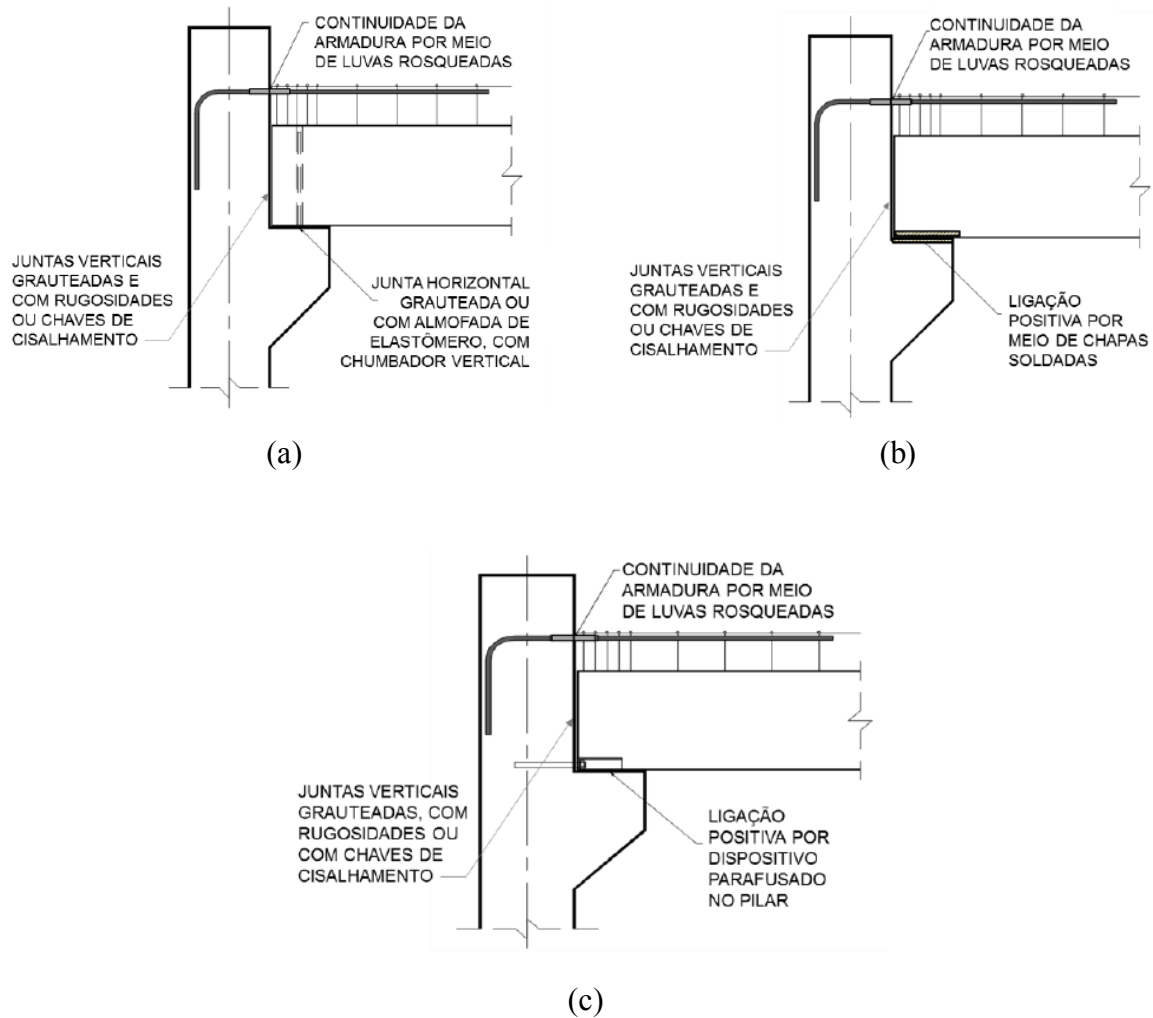


Figura 2-19. (a) Tipologia 3, (b) Tipologia 4 e (c) Tipologia 5  
Fonte: ABNT NBR 9062 (2017)

De acordo com essa mesma norma, a rigidez ao momento fletor de uma ligação viga-pilar é definida pela sua relação momento-rotação. A resposta não linear das ligações pode ser feita com base na análise linear, utilizando a rigidez secante ( $R_{sec}$ ), conforme indicada na Figura 2-20.

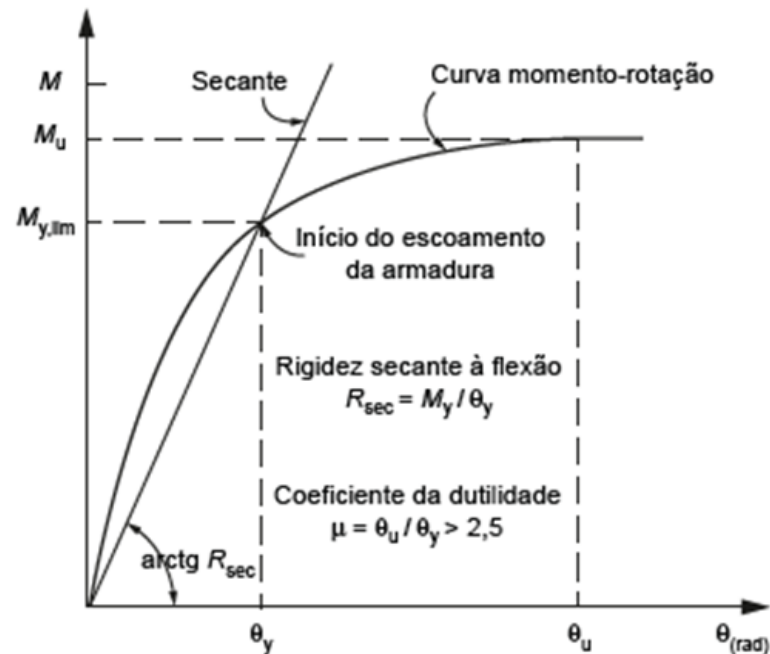


Figura 2-20. Relação momento-rotação na ligação viga-pilar.  
Fonte: ABNT NBR 9062 (2017)

As rotações efetivas nas ligações são decorrentes de mecanismos de deformação que ocorrem tanto na interface viga-pilar quanto na zona de transição na extremidade da viga, denominada região da ligação, a qual compreende trecho entre a face do pilar e o centro de giro no apoio da viga. Considerando o limite do valor da tensão na armadura de continuidade igual a  $\sigma_s \leq f_{yd}$ , conforme critérios de projeto estabelecidos na pela norma supracitada, a rigidez secante para a relação momento-rotação pode ser calculada pela Equação 3.

$$R_{sec} = k \cdot \frac{A_s E_s d^2}{L_{ed}} \quad (3)$$

De acordo com FERREIRA (1999), as ligações de elementos pré-moldados apresentam comportamento semirrígido, termo utilizado inicialmente na década de 30 e que corresponde a um comportamento intermediário entre os nós rígidos e as articulações, podendo-se aproximar de uma destas situações.

A consideração das deformabilidades das ligações nas extremidades dos elementos de viga na estrutura faz com que haja uma modificação na rigidez deste elemento, promovendo uma redistribuição dos esforços e deslocamento ao longo da estrutura. Existem diversos sistemas de classificação que estabelecem limites de separação entre essas classes de rigidez para ligações semirrígidas, as quais utilizam elementos de ligação entre as peças pré-

moldadas. BJORHOVDE *et al.* (1990) propuseram um sistema baseado em diagrama M- $\theta$  bilineares, para os momentos e as rotações normalizados, conforme apresentado na Figura 2-21.

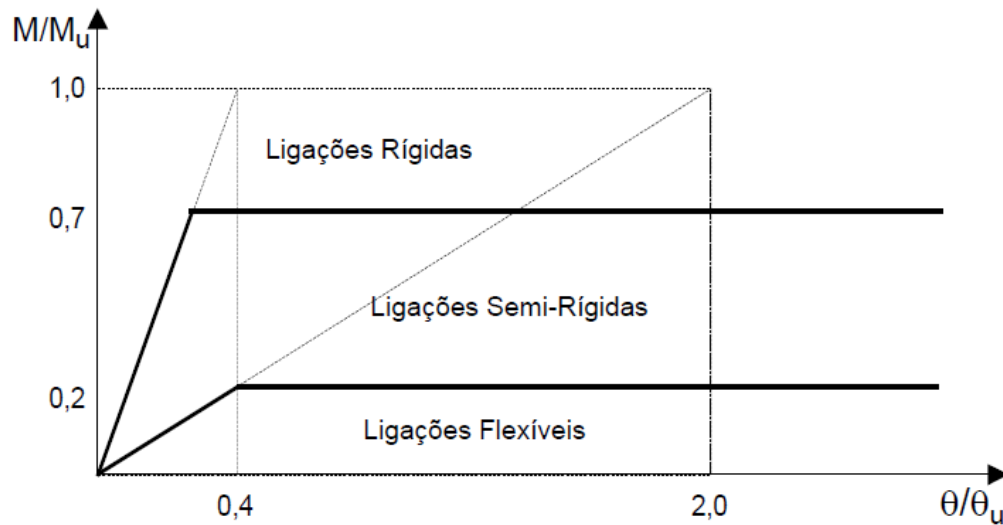


Figura 2-21. Sistema de classificação para ligações semirrígidas.  
Fonte: adaptado de BJORHOVDE *et al.* (1990)

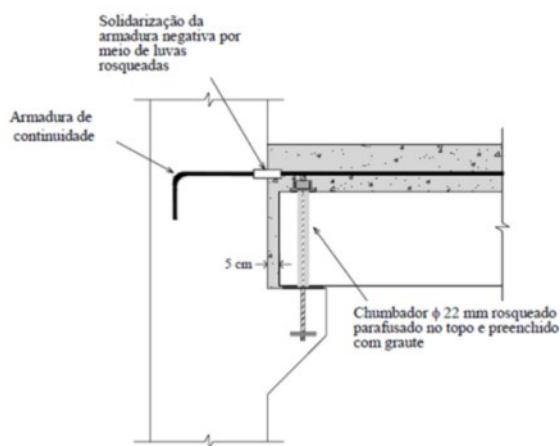
Por outro lado, FERREIRA *et al.* (2002) apresentam um sistema de classificação para ligações no qual elas são subdivididas em cinco zonas distintas, conforme indicado na Tabela 2-5. Esse sistema se baseia no fator de restrição à rotação  $\alpha_R$  que leva em conta as deformabilidades das ligações e é um número adimensional que relaciona a rigidez da ligação à rigidez da viga que nela concorre. Para as ligações consideradas semirrígidas, este fator de restrição varia de 0,15 a 0,85. Já o coeficiente de engastamento parcial ( $M_E/M_R$ ) representa a razão entre o momento fletor na extremidade da viga ( $M_E$ ) e o momento fletor de engastamento perfeito ( $M_R$ ).



Tabela 2-5. Classificação das ligações semirrígidas em estruturas pré-moldadas  
 Fonte: FERREIRA *et al.* (2002)

Zonas	Fator de Restrição à Rotação $\alpha_R$	Engastamento Parcial $M_E/M_R$	Classificação das Ligações
Zona I	$0 \leq \alpha_R < 0,14$	$0 \leq M_E/M_R < 0,20$	Articuladas (ou Flexíveis)
Zona II	$0,14 \leq \alpha_R < 0,40$	$0,20 \leq M_E/M_R < 0,50$	Semirrígidas com restrição baixa
Zona III	$0,40 \leq \alpha_R < 0,67$	$0,50 \leq M_E/M_R < 0,75$	Semirrígidas com restrição média
Zona IV	$0,67 \leq \alpha_R < 0,85$	$0,75 \leq M_E/M_R < 0,90$	Semirrígidas com restrição alta
Zona V	$0,85 \leq \alpha_R < 1,00$	$0,90 \leq M_E/M_R < 1,00$	Perfeitamente rígidas

CATOIA (2007) realizou um dos primeiros ensaios em escala real, no Brasil, de uma viga pré-moldada protendida com a presença de ligações semirrígidas compostas por armaduras de continuidade passando através dos pilares de extremidade (Figura 2-22) e luvas rosqueadas para fixação das armaduras negativas, mostrando um grande aumento da rigidez da ligação devido à presença da emenda mecânica entre os elementos estruturais. No que diz respeito às referências internacionais, este tipo de estudo também foi muito difundido por ORDÓÑEZ *et. al* (1974) e CHEOK & LEW (1991).



(a)



(b)

Figura 2-22. (a) Esquema de ligação semirrígida de uma estrutura pré-moldada protendida e (b) vista em escala real do ensaio.

Fonte: CATOIA (2007)

HABER *et al.* (2014) analisaram cinco modelos distintos de pilares de seção circular em escala reduzida, sendo um moldado no local e outros quatro pré-moldados em concreto, cujas armaduras foram emendadas por luvas. Após serem submetidos a cargas similares às de terremotos de grande escala, várias similaridades no comportamento dúctil de todos os modelos foram verificadas e apresentam resultados dentro dos parâmetros de desempenho aceitáveis descrito no escopo da CALTRANS (2010). A Figura 2-23 mostra o estágio da aparição de fissuras e a conseqüente falha na estrutura no pilar moldado no local.

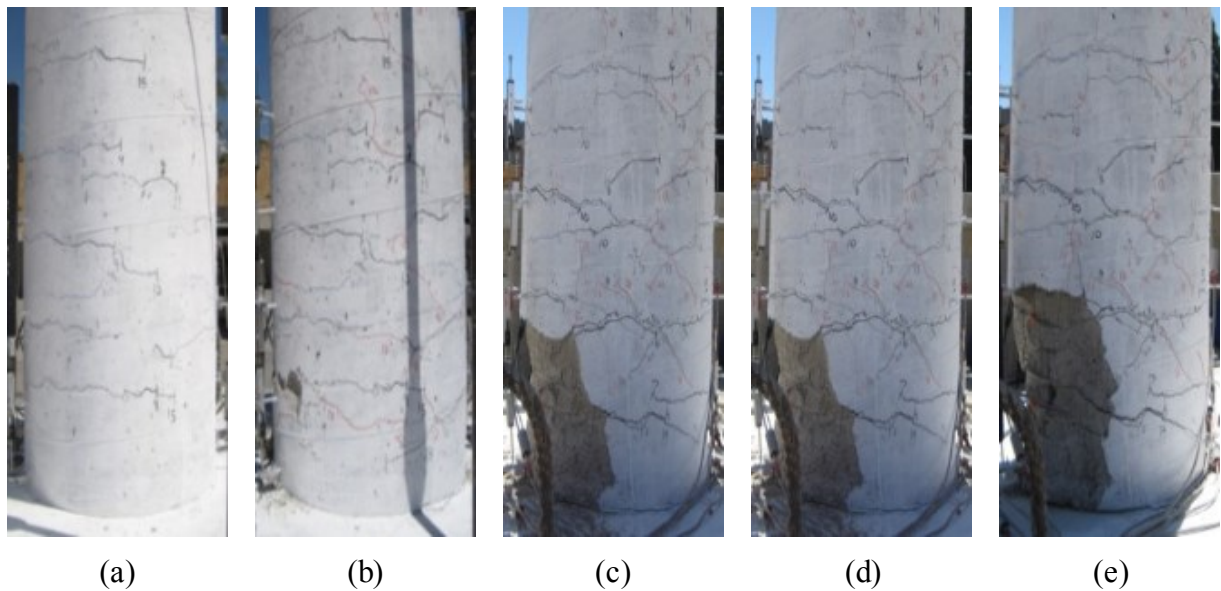


Figura 2-23. Estágio de análise do pilar moldado no local com armadura unida por luvas. (a) aparição das primeiras fissuras, (b) desenvolvimento de fissuras por cisalhamento, (c) extensão das fissuras e quebra do concreto, (d) reforço transversal e/ou transversal torna-se visível e (e) conjunto de danos e falha iminente da estrutura.

Fonte: HABER *et al.* (2014)

Também nesta linha de pesquisa, YU *et al.* (2015) avaliaram seis pilares pré-moldados de concreto, em escala real, com armaduras emendadas com luvas na direção longitudinal, reforçando-as transversalmente com estribos soldados de aço, simulando esforços provocados por abalos sísmicos; concluindo que as luvas de emenda foram capazes de resistir às tensões de tração a que foram submetidas, além de mostrar que os estribos soldados à armadura não possuem qualquer influência ou contribuem para o incremento deste parâmetro. A Figura 2-24 ilustra a distribuição das fissuras em cada um dos pilares avaliados.

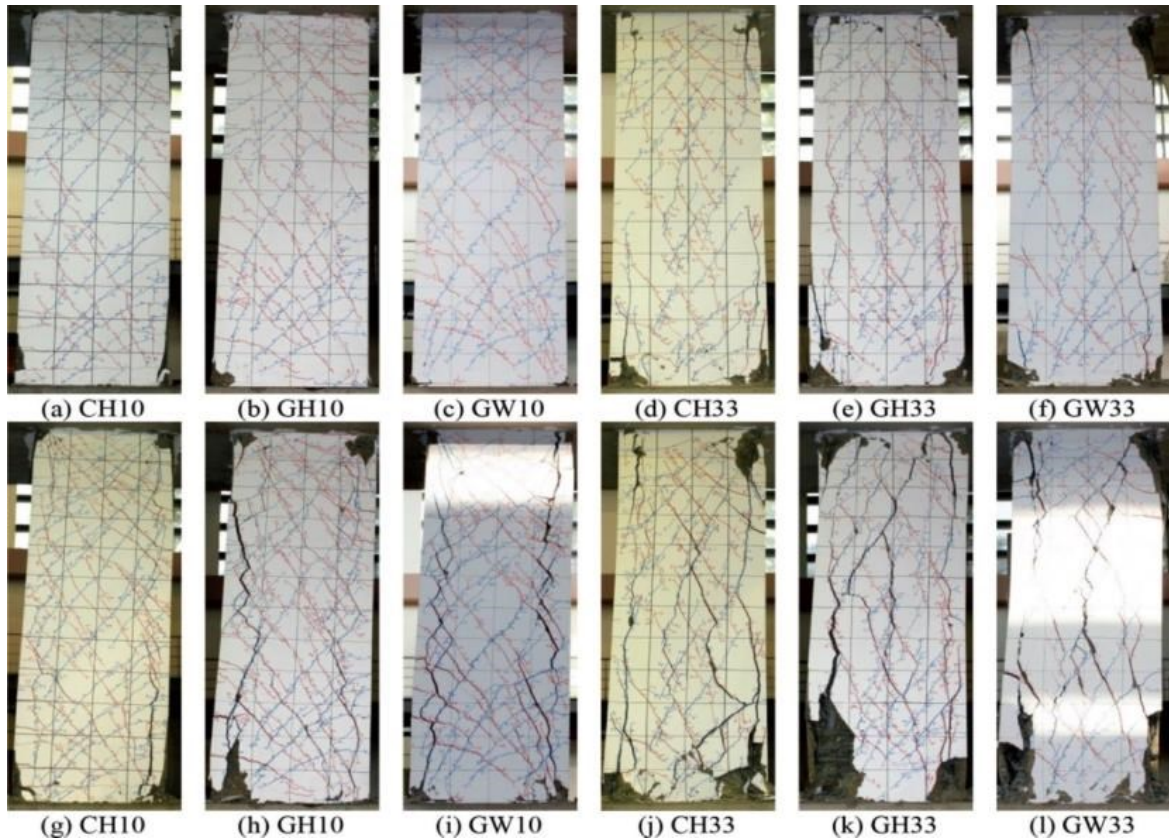


Figura 2-24. Análise das fissuras empilares pré-moldados em concreto após serem submetidos à simulação de abalos sísmicos.

Fonte: YU *et al.* (2015)

HWANG *et al.* (2015) analisaram a influência de emendas mecânicas instaladas em pilares de concreto, executados em uma região com incidência de ações sísmicas, cujo desempenho deveria satisfazer os critérios estabelecidos na ACI 318 (2014) de  $1,25 f_y$  das barras de controle previamente ensaiadas. O autor verificou que as roscas dos conectores mecânicos utilizadas para unir as barras de aço podem ser perdidas quando submetidas aos esforços de tensão-compressão sob cargas cíclicas devido aos reforços longitudinais da coluna de concreto, as quais foram submetidas durante o ensaio quase estático.

Quando o sistema de conexão foi submetido a cargas supracitadas, as fissuras ficaram concentradas na região externa do conector ao lado da rosca. Assim sendo, concluiu-se que quando as conexões de barras de aço forem utilizadas em situações semelhantes a essa, é recomendada que a proporção de emenda em uma seção seja inferior a 50% para que as fissuras não estejam concentradas diretamente na rosca da barra de aço, além de considerar também sua rigidez e ductilidade nos projetos estruturais.

## 2.4. Parâmetros de desempenho da emenda mecânica

Basicamente, assume-se no projeto que a presença de eventual emenda mecânica de duas barras de armadura não resulta na redução da resistência estrutural, da rigidez ou da ductilidade desta barra emendada. A normatização vigente de projetos de estruturas em concreto parte deste princípio, especificando detalhes de configuração destas emendas que estão mais atrelados à garantia do trabalho conjunto do aço e concreto do que, necessariamente, à garantia do comportamento estrutural adequado da emenda mecânica em questão. Daí a importância da garantia de desempenho destas emendas; atrelada à avaliação de parâmetros específicos de interesse por meio de ensaios padronizados em laboratório.

### 2.4.1. Resistência à tração

Sabe-se que os ensaios mecânicos são procedidos com o intuito de se conhecer as características dos materiais, de modo a poder projetar componentes de tal maneira que, quando em serviço, as deformações não sejam excessivas e não causem fratura. O comportamento mecânico de uma emenda reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Por caracterizar uma emenda contínua, quando esta é submetida a esforços de tração, determina-se o limite de proporcionalidade a partir do momento que o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade na curva tensão *versus* deformação, definindo assim a tensão limite de escoamento e o fim de regime elástico.

Após essa fase, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo e então diminui até a fratura do material. Para as barras de aço, cuja deformação plástica possui alta capacidade, o diâmetro da amostra decresce rapidamente ao ultrapassar este ponto máximo e assim a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura final. O limite de resistência à tração é definido, então, pela tensão no ponto máximo da curva tensão *versus* deformação, e é a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura que se encontra sob tração. Portanto, definir a resistência à tração de uma barra de aço com aplicação de emendas mecânicas é de suma importância e é um dos principais parâmetros considerado nos projetos estruturais.

Para realizar um ensaio de resistência à tração de uma barra de aço, torna-se útil separá-lo em diferentes estágios, os quais se aplicam independentemente da norma de ensaio que está sendo utilizada, que são: pré-teste, pré-carga, região elástica, fluência e região plástica.

Um controle inadequado durante o ensaio pode resultar na determinação de um ponto de fluência muito alto, muitas vezes devido à velocidade inadequada aplicada ao ensaio,

podendo até alterar seus resultados. Em muitas barras de aço, o ponto de fluência não pode ser determinado simplesmente por meio da análise dos gráficos de ensaio, devido à inexistência do patamar de escoamento, caso muito comum em ensaios cujos dados são coletados manualmente. Assim, o “método offset” é comumente utilizado. Isso requer a medição da deformação com o auxílio de um extensômetro digital ou elétrico (*strain gage*), plotando os resultados com um *offset* de 0,2%, o mais convencional entre as normas ao redor do mundo, inclusive da ABNT NBR 7480 (2007). A tensão convencional de alongamento não proporcional é determinada no diagrama tensão *versus* deformação, desenhando-se uma linha paralela à parte reta da curva e a uma distância equivalente à porcentagem não proporcional prescrita de 0,2%. O ponto de intersecção desta linha com a curva fornece a força correspondente à tensão desejada.

O valor mínimo de tensão de escoamento estabelecido nos projetos ao redor do mundo é variado entre 420 e 725 MPa e é baseado na norma de cálculo e/ou ensaio vigente em cada país ou região. No caso do Brasil, o valor mínimo de resistência ao escoamento,  $f_y$ , é aquele estipulado pela ABNT NBR 8548 (1984), que estabelece que os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração, com e sem a aplicação de luvas de emenda como elemento de união de barras de aço, devem atender os requisitos mínimos definidos pela norma ABNT NBR 7480 (2007), ou seja, para as barras tipo CA-50 avaliadas, deve ser de 500 MPa, enquanto que o limite de resistência,  $f_{st}$ , deve ser 540 MPa ( $1,08 f_y$ ).

#### **2.4.2. Deslizamento**

O deslizamento consiste em determinar o deslocamento entre a emenda mecânica e a barra de aço após o ensaio por meio da medição da extensão permanente da amostra após ser carregado. Ele é um parâmetro de projeto utilizado em muitos países, principalmente em locais onde a ação de terremotos e desastres ambientais se tornaram fatos cada vez menos raros. O valor do deslizamento é determinado ao final da aplicação ciclos de carga ao corpo de prova avaliado, os quais devem atingir um determinado percentual (depende da metodologia de ensaio da norma regulamentadora) da resistência ao escoamento,  $f_y$ , da barra de aço. Assim, o critério para determinação do valor máximo de deslizamento também é baseado na norma de cálculo e/ou ensaio vigente em cada país ou continente, cujos resultados variam de 0,1 a 0,2 mm.

Apesar de o deslizamento ser pouco utilizado no Brasil, exceção feita ao projeto estrutural das usinas nucleares, uma especificação interna da Eletrobrás Eletronuclear denominada DS-G-6647-029202 (2011) foi criada e tem sido utilizada em complemento à

ABNT NBR 11561 (1990), extinta no ano de 2002, e que especifica o valor máximo para o deslizamento de 0,1 mm. Apesar disso, este parâmetro é extremamente importante no cálculo estrutural, pois medirá a tendência do deslocamento da barra de aço em relação à luva em condições extremas de carregamento e testará a confiabilidade da continuidade estrutural, além da possibilidade de controlar a fissuração do concreto na região da emenda.

## 2.5. Normas técnicas vigentes para ensaios de resistência à tração e deslizamento

A demanda mundial pelos sistemas de emendas mecânicas de barras de aço é direta ou indiretamente dependente de uma série de exigências e conformidades relacionadas a normas técnicas ou requisitos específicos de um determinado projeto. Mundialmente, existe um grande número de normatizações relacionadas a estes sistemas e a abrangência de cada uma delas varia de acordo com cada região.

Desde que a utilização de emendas mecânicas de barras de aço tornou-se comum no mundo todo, várias comissões normativas foram formadas com o intuito de redigir normas técnicas e estabelecer parâmetros e métodos de ensaio de resistência à tração e deslizamento. Baseado nos tipos de aço existentes em diferentes países, cada norma técnica possui sua particularidade. A Tabela 2-6 apresenta, em ordem cronológica, algumas destas normas, incluindo as do Brasil, e que consideram os ensaios de resistência à tração e deslizamento em seu escopo contexto.

Por definição, o ensaio de resistência à tração consiste em agarrar as duas extremidades opostas de uma barra de aço em uma máquina de ensaios que irá aplicar uma força que resultará na elongação gradual desta amostra até sua eventual ruptura. Durante a execução desse ensaio, tanto a força quanto o deslocamento são coletados por meio de um aquisitor de dados e um software especialmente desenvolvido para tal processo. (DAVIS, 2004).

Tabela 2-6. Normas técnicas vigentes que se referem aos ensaios de resistência à tração ou deslizamento.  
Fonte: Autor













Local	Normatização	Ano de Publicação	Resistência à tração	Deslizamento
Brasil	ABNT NBR 8548	1984		
Reino Unido	BS 8110 (TA1-B)	1997		
França	BNA NF A35-020	1999		
EUA	ASTM A1034	2004		

Tabela 2-7. Normas técnicas vigentes que se referem aos ensaios de resistência à tração ou deslizamento (continua).  
Fonte: Autor

Alemanha	DIN 1045	2008		
Internacional	ISO 15835	2009		
Brasil	Eletróbrás Eletronuclear DS-G-6647-029202	2011		
EUA	CALTRANS 670	2011		

Já o ensaio de deslizamento consiste em medir o deslocamento entre a luva e barra de aço após uma série de ciclos de carregamento, variado em alguns países. Projetistas dos países latino-americanos (com exceção do Brasil) consideram as características técnicas das emendas de acordo com as especificações da ACI 318 (2014), uma vez que esta analisa estruturas chamadas Tipo 1 (sem incidência de sismo) e Tipo 2 (com incidência de sismo). A Tabela 2-8 expõe, em ordem alfabética por país, os valores mínimos que devem ser encontrados nos ensaios de resistência à tração e deslizamento nas principais normas técnicas atualmente vigentes.

Tabela 2-8. Comparativo entre as normas técnicas nacionais e internacionais e os valores mínimos de ensaio.  
Fonte: Autor

País	Norma	Classe do aço	Resistência ao escoamento $f_y$ (MPa)	Limite de resistência $f_{st}$ (MPa)	Deslizamento máximo (mm)
Alemanha	DIN 1045	420S 500S 500M	420 500 500	550	0,10 a 252MPa 0,10 a 300MPa (60% $f_y$ )
Áustria	ONORM B4700	550	550	620	0,10 a 330MPa (60% $f_y$ )
Austrália	AS 3600	250R 400Y	250 400	275 440	Não considerado no escopo
Bélgica	ATG 95/2968	BE 220S BE 400S BE 500S	220 400 500	231 420 525	0,10 a 132MPa 0,10 a 240MPa 0,10 a 300MPa (60% $f_y$ )
Brasil	ABNT NBR 7480	CA-50	500	540	Não considerado no escopo

Tabela 2-7. Comparativo entre as normas técnicas nacionais e internacionais e os valores mínimos de ensaio  
(continua)  
Fonte: Autor

Brasil	Eletronuclear DS-G-6647- 029202	CA-50	540	648		0,10 a 324MPa (60% $f_y$ )
Canadá	CAN3- N287.2-M82	300R 400R 500R 400W 500W	Não especifica	405 540 675 540 625		Não considerado no escopo
EUA	ASTM A615	Grau 60	420	525 (Tipo 1)	620 (Tipo 2)	Não considerado no escopo
EUA	ASTM A615	Grau 80	550	690 (Tipo 1)	725 (Tipo 2)	Não considerado no escopo
EUA	ASTM A706	Grau 60	420	525 (Tipo 1)	620 (Tipo 2)	Não considerado no escopo
EUA	ASTM A706	Grau 80	550	690 (Tipo 1)	725 (Tipo 2)	Não considerado no escopo
França	NF-A-32-020	500	500	550		0,10 a 0,20 a 300MPa (70% $f_y$ )
Holanda	BRL-0504	500	500	550		0,10 a 350MPa (60% $f_y$ )
Hong Kong	UNK Várias Especificações	500	500	550		0,20 a 300MPa (60% $f_y$ )
Malásia	MS 146	250 410 460	Não especifica	288 529 506		Não considerado no escopo
Nova Zelândia	NZS 3101	500E	500	725		0,10 a 300MPa (60% $f_y$ )
Reino Unido	BS 8110 (TA1-B)	B500A B500B B500C	500	525 540 575		0,10 a 342MPa 0,10 a 351MPa 0,10 a 374MPa (65% $f_y$ )



## 2.5.1 Normas Brasileiras

### 2.5.1.1. ABNT NBR 8548 (1984)

A ABNT NBR 8548 (1984) contempla apenas o método de ensaio de resistência à tração de uma emenda mecânica e não leva em consideração o parâmetro deslizamento em seu escopo. O valor mínimo da resistência ao escoamento,  $f_y$ , com e sem a aplicação de luvas de emenda como elemento de união de barras de aço, devem atender os requisitos mínimos definidos pela norma ABNT NBR 7480 (2007), ou seja, para as barras tipo CA-50, deve ser de 500 MPa, enquanto que a tensão na ruptura mínima,  $f_{st}$ , deve ser 540 MPa ( $1,08 f_y$ ).

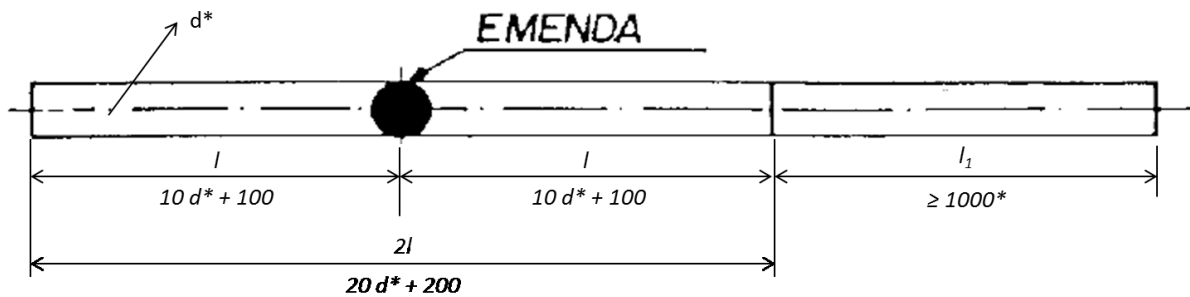
A Tabela 2-9 mostra os valores mínimos a serem obtidos nos ensaios de resistência à tração, segundo a ABNT NBR 7480 (2007), para as categorias de aço existentes no mercado nacional.

Tabela 2-9. Valores mínimos a serem obtidos nos ensaios de resistência à tração.  
Fonte: Tabela B.3 da ABNT NBR 7480 (2007)

Categoria	Valores mínimos de tração				
	Resistência ao escoamento $f_y$ (MPa)	Limite de resistência $f_{st}$ (MPa)		Alongamento após a ruptura em $10\phi$ %	Alongamento total da força máxima $A_{gt}$ %
CA 25	250	$1,20 f_y$	300	18	-----
CA-50	500	$1,08 f_y$	540	8	5
CA 60	600	$1,05 f_y$	630	5	-----

#### ➤ Dimensões da amostra

A ABNT NBR 8548 (1984) especifica que a barra de aço deve ser separada em três segmentos distintos, de acordo com a Figura 2-25. O segmento  $l_1$ , cuja dimensão mínima deve ser 1000 mm, é separado para ensaio de avaliação da resistência ao escoamento da barra propriamente dita, que da mesma maneira, será conduzido conforme procedimento descrito. O comprimento restante,  $2l$ , será a dimensão da amostra emendada. A dimensão da amostra de barras com emenda mecânica é o mesmo dos com emenda por solda. A dimensão mínima total da parte  $l$  é calculada por  $10d + 100$ . Considerando outros tipos de luvas de emenda, a dimensão da amostra independe do tipo que será aplicado, uma vez que a única variável considerada é o diâmetro  $d$  da barra de aço.



\* Diâmetro "d" da barra de aço e demais dimensões devem ser tomadas em mm

Figura 2-25. Amostra para ensaio de qualificação de emendas mecânicas.  
Fonte: modificado da ABNT NBR 8548 (1984).

### ➤ Ensaio de resistência à tração

Apesar de ser uma norma publicada há mais de 30 anos, a ABNT NBR 8548 (1984) é a única dentre as mencionadas anteriormente que cita a necessidade de realizar um ensaio de resistência à tração somente com a barra de aço sem a adição de luva para fins comparativos. Para iniciar, deve-se cortar a parte  $l_1$  da amostra e adequar seu comprimento à máquina de ensaio, conduzindo o teste conforme a ABNT NBR 6152 (2002) e ABNT NBR 7480 (2007), a fim de determinar a resistência ao escoamento e resistência última à tração, utilizando o valor nominal da área de seção da barra de aço. É aceitável reduzir seu comprimento a fim de adequá-lo à máquina universal de tração a ser usada no ensaio.

Coloca-se a amostra no equipamento de ensaio, marcando sobre o mesmo, um trecho onde a emenda será instalada, de  $10d$ , a fim de determinar seu alongamento ao fim do ensaio. A ABNT NBR 8548 (1984) aponta a necessidade de adaptar um extensômetro, sem especificar, porém, o tipo, à amostra, tracionando-o até atingir uma tensão igual a 70% do valor da resistência ao escoamento do segmento da barra sem emenda (trecho  $l_1$ ), sem ultrapassar, porém, 80% da resistência ao escoamento,  $f_y$ , da categoria de aço ensaiado, conforme ABNT NBR 7480 (2007) e ABNT NBR 6118 (2014).

Após, deve-se calcular o alongamento do segmento da barra sem emenda, tendo por base o trecho marcado, retirando o extensômetro e aumentando a carga até atingir uma tensão de 2 a 4% maior do que o valor da resistência ao escoamento do segmento da barra sem emenda. Reduz-se, então, a carga até atingir uma tensão igual ou inferior a 20% do valor da resistência ao escoamento do segmento da barra sem emenda, aumentando-se novamente a carga até a ruptura da amostra. Por fim, a tensão convencional à ruptura é calculada por meio da divisão da carga máxima aplicada na amostra pela seção nominal da barra de aço ( $\sigma = F/A$ ), observando-se o local onde ela ocorreu.

### 2.5.1.2. Eletrobrás Eletronuclear DS-G-6647-029202 (2011)

O documento DS-G-6647-029202 é uma especificação interna da Eletrobrás Eletronuclear e tem sido utilizada em complemento à ABNT NBR 11561 (1990), extinta no ano de 2002. De uma maneira geral, esse documento abrange as exigências técnicas e os requisitos necessários na aquisição e utilização de barras de aço, luvas para emendas mecânicas, dispositivos de ancoragem, fios e cordoalhas de aço e telas de aço soldado, usado na confecção das armaduras de elementos de concreto armado e protendido na usina eletronuclear Angra 3 em Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro. Apesar de não ser uma norma oficial de acordo com os padrões ABNT, esse documento é extremamente importante, pois é o único no Brasil que considera o procedimento executivo do ensaio de deslizamento.

#### ➤ Dimensões da amostra

A Figura 2-26 mostra um arranjo adaptado do método de ensaio de deslizamento, porém não especifica medidas mínimas e máximas para a amostra. As extremidades da luva de emenda e as barras de aço deverão estar munidas de anéis de medição e de apoio. Em cada um dos anéis de medição deverão ser instalados três relógios comparadores. Os dispositivos 1 e 4 (considerando as duas extremidades) medirão os deslocamentos entre as extremidades da luva e os anéis de medição, enquanto que os dispositivos 5 e 6 medirão os deslocamentos entre tais anéis. Para isso, serão usadas duas hastes diametralmente opostas, fixadas em uma extremidade em um dos anéis de medição e a outra extremidade ficará livre, na qual serão encostados os dispositivos de medição 5 e 6 (relógios comparadores).

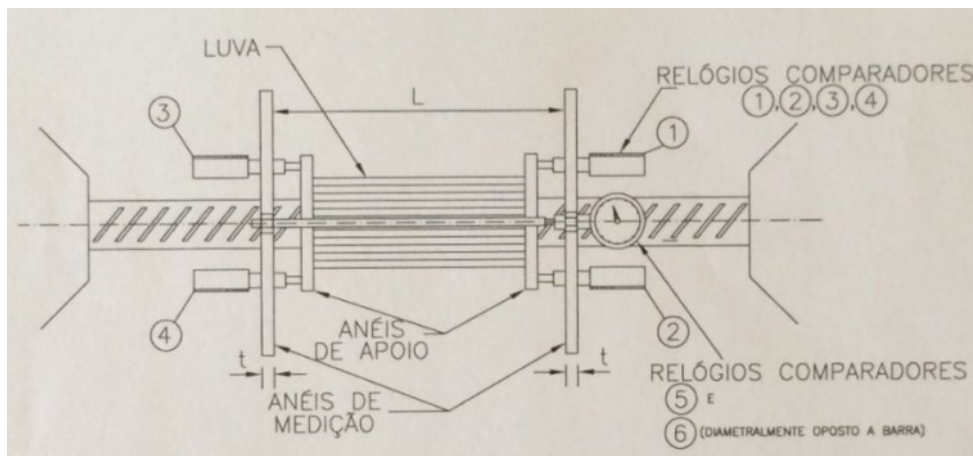


Figura 2-26. Método de ensaio para medir o deslizamento.  
Fonte: DS-G-6647-029202 (2011).

➤ **Ensaio de resistência à tração**

O documento DS-G-6647-029202 (2011) considera que os valores para resistência à tração válida para aplicação das luvas de emenda na usina Eletronuclear devem ser relacionados à norma ABNT NBR 7480 (2007), porém com resistência ao escoamento,  $f_y$ , de 540 MPa e limite de resistência,  $f_{st}$ , de 648 MPa, valor equivalente a  $1,20 f_{st}$  estipulado na referida norma. Esse documento não descreve o método de ensaio, porém menciona que ele deve ser baseado na ABNT NBR 6152 (2002), cujo lote para aprovação das luvas deverá conter 33 ensaios de cada diâmetro de barra de aço. Este quantitativo é muito particular da obra em questão, pois é muito superior ao plano de amostragem mínimo normalmente recomendado.

➤ **Ensaio de deslizamento**

A fim de ajustar o dispositivo de ensaio, deve-se, após a montagem, carregar a emenda mecânica até atingir uma tensão correspondente a 10% da carga nominal de serviço (29 MPa) especificada pelo documento DS-G-6647-029202, sendo então efetuado o descarregamento. Deve-se iniciar a leitura dos relógios comparadores  $\Delta_{S0,1}$ ,  $\Delta_{S0,2}$ ,  $\Delta_{S0,3}$ ,  $\Delta_{S0,4}$ ,  $\Delta_{S0,5}$  e  $\Delta_{S0,6}$ , ou, simplesmente, zerar os relógios. A emenda mecânica é novamente carregada até atingir a carga nominal de serviço ( $0,58 f_y = 290$  MPa) que, após a estabilização dos relógios comparadores, efetuam-se as novas leituras deles ( $\Delta_{S1,1}$ ,  $\Delta_{S1,2}$ ,  $\Delta_{S1,3}$ ,  $\Delta_{S1,4}$ ,  $\Delta_{S1,5}$  e  $\Delta_{S1,6}$ ). Após tais leituras dos relógios comparadores, a emenda é novamente descarregada e uma nova leitura deve ser registrada ( $\Delta_{S2,1}$ ,  $\Delta_{S2,2}$ ,  $\Delta_{S2,3}$ ,  $\Delta_{S2,4}$ ,  $\Delta_{S2,5}$  e  $\Delta_{S2,6}$ ). Após a última leitura, os relógios são removidos e a emenda mecânica é carregada até a ruptura, a fim de que sejam determinadas as cargas de escoamento e ruptura. O ensaio deverá ser executado incrementando-se a tensão com velocidade constante de 10 MPa/segundo e os gráficos correspondentes deverão ser plotados.

Para a determinação do deslizamento total, dois métodos distintos de medição, direto e indireto, são utilizados; porém, somente o maior valor encontrado será adotado como deslizamento da emenda mecânica. O deslizamento total pelo método direto é encontrado por meio da Equação 4, enquanto que pelo método indireto é acurado pela Equação 5 e o  $\Delta_L$  (alongamento teórico sob a carga nominal de serviço) pela Equação 6.

$$\Delta_s = \frac{[(\Delta_{S2,1} - \Delta_{S0,1}) + (\Delta_{S2,2} - \Delta_{S0,2}) + (\Delta_{S2,3} - \Delta_{S0,3}) + (\Delta_{S2,4} - \Delta_{S0,4})]}{2} \quad (4)$$

$$\Delta_S = \frac{[(\Delta_{S1,5} - \Delta_{S0,5}) + (\Delta_{S1,6} - \Delta_{S0,6})]}{2} - \Delta_L \quad (5)$$

$$\Delta_L = \frac{N_S \cdot L_0}{A_S \cdot E} \quad (6)$$

## 2.5.2. Norma internacional

### 2.5.2.1. ISO 15835 – Part 2 (2009)

É a norma internacional que especifica os métodos de ensaio aplicáveis às luvas de aço para emendas mecânicas. Seu escopo é bastante completo e detalha tanto os procedimentos dos ensaios de resistência à tração e de deslizamento, quanto os de fadiga de alto e baixo ciclo.

#### ➤ Dimensões da amostra

As dimensões da amostra, segundo recomendação da norma internacional ISO 15835 (2009), estão ilustradas na Figura 2-27, onde  $L$  = comprimento total da emenda mecânica;  $L_1$  = comprimento da luva de emenda;  $L_2 = 2d$ ;  $L_3 = 2d$  e  $L_g$  = comprimento livre da amostra,  $L_1 + 8d$ . Assim, segundo a norma ISO 15835(2009), para determinar a dimensão de amostras utilizando diferentes tipos de luvas de emenda, basta substituir os valores das variáveis  $d$  e  $L_1$ . Além disso, a dimensão livre da amostra de barra emendada na máquina universal de tração (distância entre as garras) deve ser no mínimo  $400 + L$ .

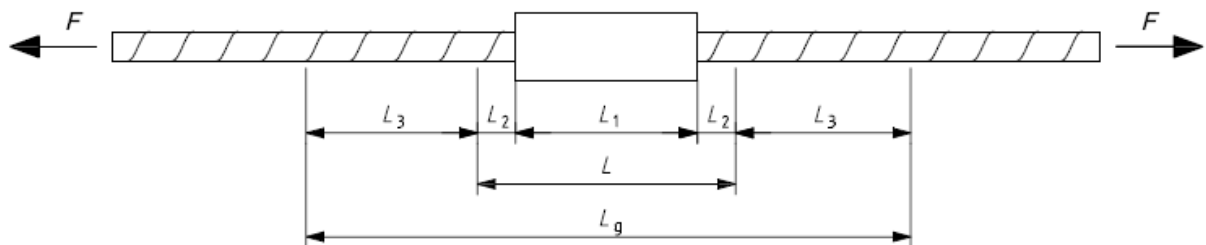


Figura 2-27. Definição do comprimento da amostra para ensaio.

Fonte: ISO 15835 (2009).

#### ➤ Ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência à tração deverá estar de acordo com a norma ISO 15630 (2009). A reta do gráfico tensão *versus* deformação deve ser considerada como a linha que une os pontos correspondentes a  $0,2F_m$  e  $0,5F_m$ . O ensaio deverá ser invalidado caso a curva da reta supracitada diferir em mais de 10% do valor teórico de  $E$ . Para o cálculo das propriedades de tensão, a seção nominal da barra de aço deverá ser utilizada, a não ser que

especificado de maneira distinta ao informado pelo fabricante do aço. Caso ocorra qualquer falha com relação à garra do equipamento, o ensaio deverá ser invalidado.

➤ **Ensaio de deslizamento**

A ISO 15835 (2009) recomenda que o limite máximo de deslizamento seja inferior a 0,1 mm. Essa mesma norma sugere, ainda, uma metodologia de ensaio a ser seguida na obtenção deste parâmetro; onde a amostra é submetida a três ciclos definidos de carga até a tensão nominal de serviço especificada para a barra CA-50 ensaiada, neste caso  $0,60 f_y = 300$  MPa, medindo-se ao final do terceiro ciclo, o valor do deslizamento. A velocidade máxima recomendada para o ensaio é de 500 MPa/minuto.

## **2.6. Métodos de execução de ensaio e instrumentação das amostras**

Devido à inexistência de pesquisas acadêmicas de barras de aço emendadas por luvas ensaiadas de maneira isolada no Brasil, buscou-se-se na literatura internacional métodos de ensaio e instrumentação que abrangessem todos os aspectos técnicos necessários para atestar as luvas como solução para emenda de barras de aço. Foram encontradas diversas maneiras de ensaiar e instrumentar as referidas emendas. Mesmo no âmbito internacional, o tema é bastante novo e somente nos últimos 20 anos as emendas mecânicas passaram a ser estudadas com mais frequência devido à demanda mundial por este tipo de solução em grandes obras de infraestrutura.

De maneira geral, nota-se que a maioria das pesquisas não considera uma quantidade representativa de amostras ensaiadas em escala. De forma cronológica, serão explicitadas, a seguir, várias pesquisas realizadas desde que tais emendas passaram a ser utilizadas com mais frequência nas obras de infraestrutura.

NOUREDDINE (1996) realizou quatro ensaios de resistência simples à tração em barras com fluência característica de 420 MPa conectadas com luvas de rosca cônica de 57 mm. Todas as barras foram arrancadas dos conectores, que permaneceram intactos (Figura 2-28a). A resistência última à tração média para tais ensaios apresentou valores 15% inferiores às barras de controle, enquanto que a deformação na ruptura foi, em média, 2%.

Nesse mesmo conjunto de ensaios, realizaram-se ainda quatro testes de resistência simples à tração em barras de aço de mesmas características conectadas com luvas prensadas de 57 mm (Figura 2-28b). Os resultados da resistência última à tração foram comparados aos das barras de controle, e deformação média na ruptura foi de 8%, percentual superior aos encontrados nos ensaios anteriores. A ruptura se deu tanto na barra de aço quanto pelo

arrancamento da luva prensada. Essa pesquisa apontou que este tipo de emenda é eficaz como mecanismo de dissipação de energia através de atrito, sem degradação grave na carga.

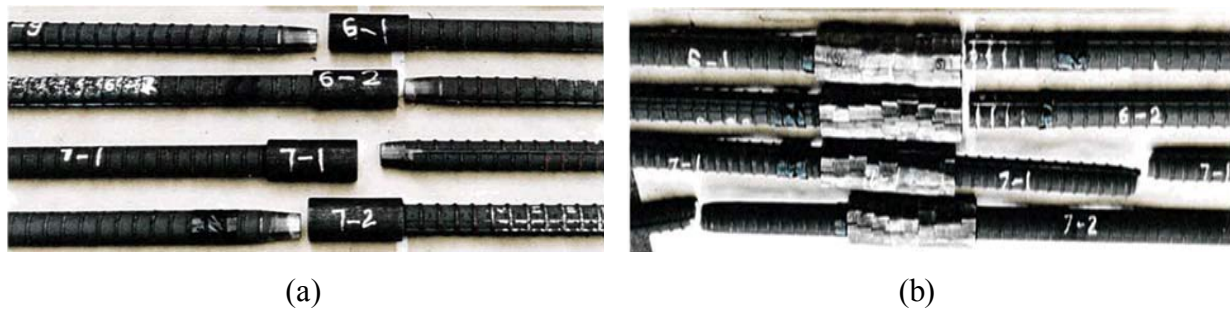


Figura 2-28. Luvas (a) rosca cônica e (b) prensadas; após o ensaio realizado  
Fonte: NOUREDDINE (1996).

De maneira mais abrangente, LLOYD (2001) ensaiou 160 amostras de luvas parafusadas de 20 e 25 mm de diâmetro, sendo 80 ensaios simples de resistência à tração e outros 80 ensaios cíclicos, todas elas em barras de aço com fluência característica de 420 MPa. O resultado médio dos ensaios simples à tração mostrou a garantia de 90% da resistência à tração das barras de aço sem emenda mecânica ensaiada previamente, ou seja, estavam de acordo com a norma ASTM 1034 (2005), utilizada como base para a referida pesquisa.

COOGLER (2006) conduziu uma bateria de ensaios em luvas de emenda com cunha dupla (Figura 2-29). Todos eles foram realizados em uma máquina universal de tração com capacidade de 90 kN. As amostras foram carregadas monoliticamente a uma velocidade aproximada de 500 MPa/minuto até a ruptura da barra de aço ou até o momento que o deslizamento excedesse 25,4 mm. Foram ensaiadas 10 amostras de luvas para cada diâmetro de barra de aço (12,5, 16 e 20 mm) com 760 mm de comprimento total. Inicialmente, pretendia-se manter a rigidez rotacional constante a fim de manter seu comprimento intacto, porém, isso rapidamente mostrou-se impraticável, decidindo-se, portanto, manter o comprimento da amostra constante ao invés da referida rigidez.

Os valores axiais de deformação foram obtidos utilizando extensômetros elétricos tipo *strain gages*, instalados a uma distância de 38 mm em cada lado da emenda. Transdutores tipo LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*) foram colocados na projeção descarregada da barra emendada em ambos os lados para medir o deslizamento. Todas as leituras de deformação, tensão e deslizamento foram gravadas de maneira intermitente durante todo o ensaio por um aquisitor de dados.

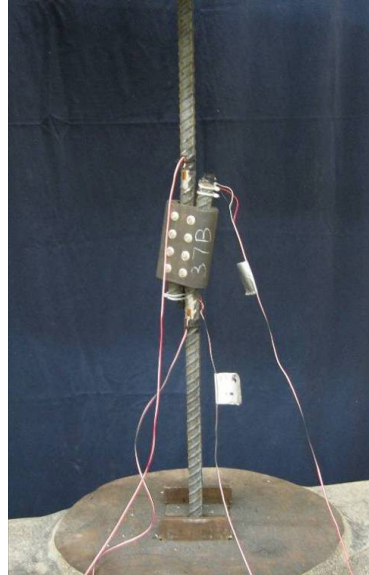


Figura 2-29. Luva com cunha dupla devidamente instrumentada nos ensaios  
Fonte: COOGLER (2006).

HILLIS & SAIIDI (2009) ensaiaram quatro amostras de luva parafusada de 13 mm de diâmetro e barras de aço com fluência de 420 MPa. Não foram observados falhas nem deslizamento nas luvas. Em todas as amostras, a ruptura localizou-se na barra de aço, distante da região da luva, concluindo a eficácia do material, apesar de pequena quantidade ensaiada, desenvolvendo a tensão requerida e a ductilidade das barras emendadas.

ROWELL *et al.* (2009) ensaiaram nove amostras de luvas parafusadas sob velocidades variadas (denominadas baixa, média e alta) e mostraram resultados bastante distintos. A resistência à tração apresentou valores de 16 a 27% abaixo das barras de controle, ilustrando que a velocidade poderia estar influenciando nos resultados do ensaio. O modo dominante de falha foi a ruptura da barra sob o primeiro ou segundo parafuso, cujo conector possuía sete unidades. Essa falha prematura foi verificada devido à concentração de tensões sob os parafusos de cisalhamento, resultando numa tensão final mais baixa e uma ductilidade significativamente inferior em comparação com as barras de controle.

Nessa mesma pesquisa, o autor ensaiou nove amostras de 32 mm de diâmetro de luva de rosca cônica e outras nove de luva com rosca paralela. Todos os ensaios foram também procedidos sob velocidades variadas, e os valores da resistência ao escoamento,  $f_y$ , e o limite de resistência,  $f_{st}$ , de ambos os tipos de luva foram comparadas às barras de controle ensaiadas. Ensaçadas em baixa velocidade, a deformação das amostras da luva de rosca cônica apresentou valor médio de 11% em comparação com os 10% das barras de controle, enquanto que as luvas de roca paralela apresentaram valor médio de 7%.



Sob velocidade intermediária, a luva de rosca cônica apresentou resistência ao escoamento,  $f_y$ , 8% inferior à barra de controle, e a luva de rosca paralela mostrou resultados muito similares a esse. Já sob velocidade rápida, a resistência ao escoamento,  $f_y$ , das amostras emendadas por luva de rosca cônica apresentou resultados próximos aos da barra de controle, entretanto, limite de resistência,  $f_{st}$ , 24% inferior, enquanto que a luva de rosca paralela mostrou ambos os resultados bastante próximos aos da barra de controle. Em resumo, a luva de rosca cônica apresentou desempenho inferior com ruptura prematura das barras na rosca, enquanto que a luva de rosca paralela atingiu a tensão e deformação mínima requerida para uma barra com 420 MPa de fluência característica.

ALAM *et al.* (2010) ensaiaram nove amostras de barra de aço conectadas por luvas parafusadas com diâmetros variados de 13 a 19 mm, tipos não muito comuns em obras de infraestrutura. Os resultados mostraram que a resistência à tração das barras testadas pode ser alcançada, sendo que em todas elas a ruptura foi observada na barra de aço. O deslizamento das barras dentro das luvas era mínimo antes do ponto de fluência, mas significativo após tal ponto.

HUACO & JIRSA (2012) testaram dois tipos distintos de luvas parafusadas de um mesmo fornecedor, sendo uma mais curta de três parafusos (Figura 2-30a) e outra mais longa com quatro parafusos (Figura 2-30b) instaladas em barras de 25 mm e a resistência ao escoamento,  $f_y$ , de 420 MPa. Os resultados mostraram que as luvas parafusadas curtas romperam em seu eixo longitudinal, enquanto que para a luva mais longa, a ruptura deu-se na barra de aço. Foi observado que esta última pode suportar deformação três vezes superior se comparadas com as luvas mais curtas.



(a)



(b)

Figura 2-30. Instrumentação da luva tipo parafusada (a) curta e (b) longa.  
Fonte: HUACO & JIRSA (2012)

CONNAH (2013) ilustra, pela Figura 2-31, um modelo de instrumentação utilizado nos ensaios de sua pesquisa. De acordo com o autor, a distância entre a garra e a face da luva deve ser entre  $2d$  e  $5d$ , medindo a resistência à tração por uma máquina universal de ensaio. O deslizamento é obtido pelo valor médio das leituras de dois ou três transdutores. Concluiu-se que as especificações de ensaio para emendas mecânicas variam, dependendo da autoridade especificadora e país de aplicação. Quando se considera a utilização de emendas mecânicas, o projetista deve determinar os critérios de desempenho do tipo de conector exigido e consultar os fabricantes que podem fornecer experiência na seleção de um sistema adequado e econômico.

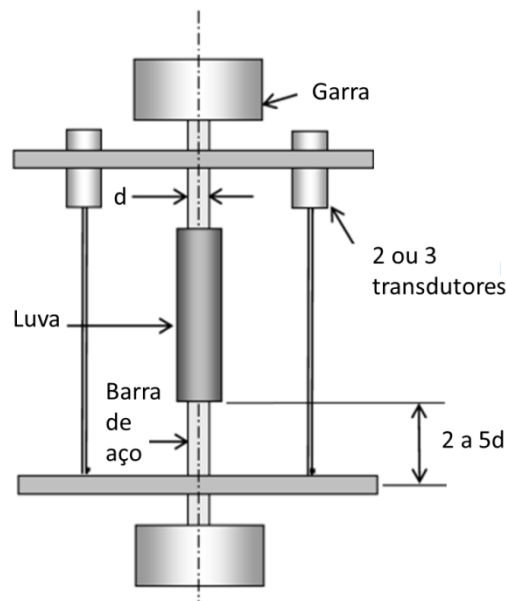


Figura 2-31. Modelo de instrumentação com transdutores aplicados na pesquisa.  
Fonte: adaptado de CONNAH (2013)

ALAM *et al.* (2014) utilizaram uma máquina universal de tração para testar dois tipos de conectores mecânicos: circular e oval, ambos parafusados. A barra de aço emendada foi inserida através de uma placa de aço circular de grande espessura, a qual atuou como uma placa de reação para o conector que permitiria arrancar a barra sob efeitos de tração (Figura 2-32). Um transdutor ligado à barra por uma braçadeira foi colocado sob a placa circular de alumínio para medir o deslizamento da barra com relação à luva. Os resultados dos testes apresentados para a luva parafusada circular mostraram que as amostras ensaiadas poderiam produzir a resistência total, assim como o deslizamento máximo especificado de 0,1 mm.

Todas as amostras conectadas a tal tipo de sistema romperam e forneceram ductilidade suficiente. Inversamente, todas as amostras da luva circular tipo oval não

conseguiram produzir a resistência final das barras, pois após atingir o limite de fluência, não houve qualquer aumento na carga, que caiu repentinamente, rompendo tais amostras. A instrumentação mostrou-se bastante eficiente devido a sua facilidade e simplicidade na execução.

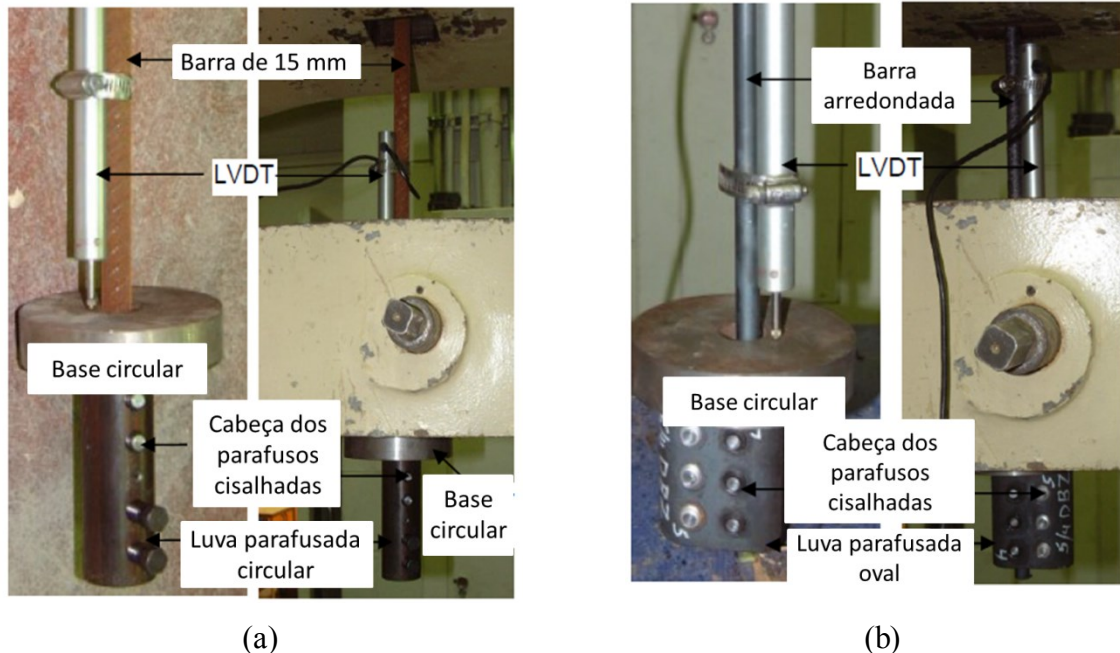


Figura 2-32. Instrumentação da luva de emenda tipo parafusada (a) circular e (b) oval.  
Fonte: adaptado de ALAM *et al.* (2014)

TASKIN (2015) realizou dois tipos de ensaio para avaliar o comportamento de tipos distintos de emenda mecânica: ensaios simples de resistência à tração e cíclico. Foram obtidas quinze amostras de cada fabricante, dividindo-as em dois grupos. Destas, nove foram ensaiadas à tração até a ruptura e as seis amostras restantes foram ensaiadas ciclicamente a 4% de deformação uniformemente em 16 ciclos sendo, então, levados à ruptura. A barra de aço testada foi de 32 mm com aço S420 com comprimento variado de  $20d$  a  $25d$ . A deformação foi medida utilizando três transdutores instalados em intervalos de 180 graus ao redor da circunferência da amostra. O propósito de se utilizar três medidores foi para evitar qualquer tipo de deformação inicial da junção barra/emenda mecânica, além de assegurar o alongamento preciso ao longo de ambos os ensaios. Os resultados dos ensaios mostraram que as emenda mecânicas são capazes de conectar efetivamente as barras de aço, indicando serem mais resistentes que as barras de aço sem conexão, tanto em fluência quanto na resistência última.

Na pesquisa de HABER *et al.* (2015), avaliou-se o desempenho de dois tipos de luva de aço (rosqueada tipo cônica e grauteada), com 20 mm de diâmetro, de acordo com o método especificado na CALTRANS 670 (2011), bastante similar ao método proposto pela ISO 15835 (2009). Os resultados dos ensaios comprovaram a eficiência do método proposto, principalmente no que diz respeito à instrumentação empregada, onde quatro extensômetros elétricos foram instalados, sendo dois nas barras de aço a uma distância de  $4d$  das faces externas da luva e outros dois nas próprias luvas, além de um transdutor de deslocamento individual posicionado nas barras para determinação do deslocamento relativo entre barra e luva (Figura 2-33).

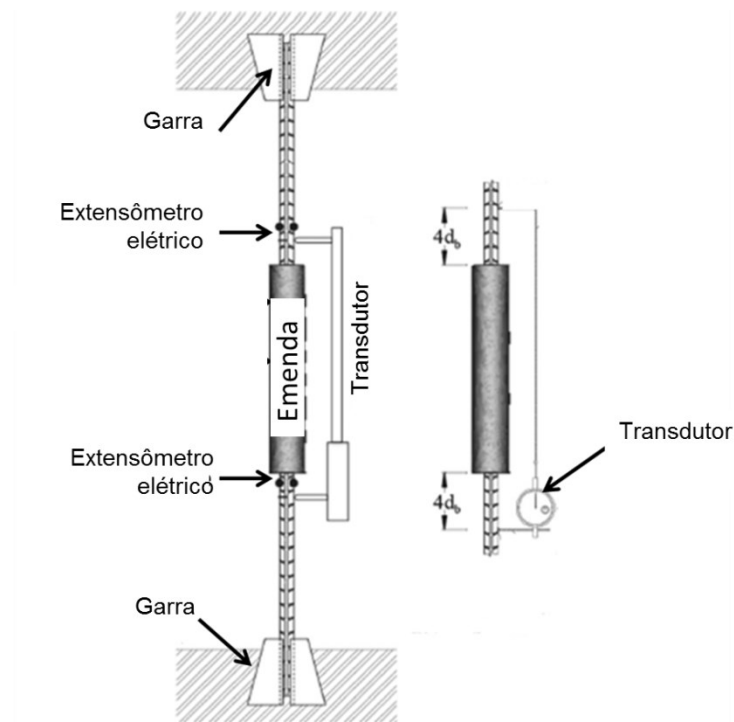


Figura 2-33. Instrumentação da emenda mecânica.

Fonte: adaptado de HABER *et al.* (2015)

NGUYEN e MUTUSUYOSHI (2015) analisaram a influência da qualidade das luvas de aço no comportamento de uma estrutura de concreto armado instaladas incorretamente. Foram realizados ensaios em seis tipos diferentes de emendas mecânicas do tipo grauteada, cujos comprimentos foram variados e dependentes do tipo de material utilizado. Foram utilizados dois extensômetros elétricos e dois transdutores tipo LVDT em cada amostra ensaiada (Figura 2-34), sendo estes últimos apoiados sobre uma base fixa circular para evitar sua movimentação ao longo do ensaio, o qual foi testado à tração até sua ruptura ou até que a barra fosse arrancada da emenda. A maneira às quais as amostras foram

instrumentadas e ensaiadas apresentaram resultados claros e suficientes para concluir que quando as barras de aço não são inseridas em todo o comprimento da emenda, a ruptura se dá por arrancamento, mostrando a necessidade de aplicação de uma maneira corretiva ao longo de todo o seu comprimento.

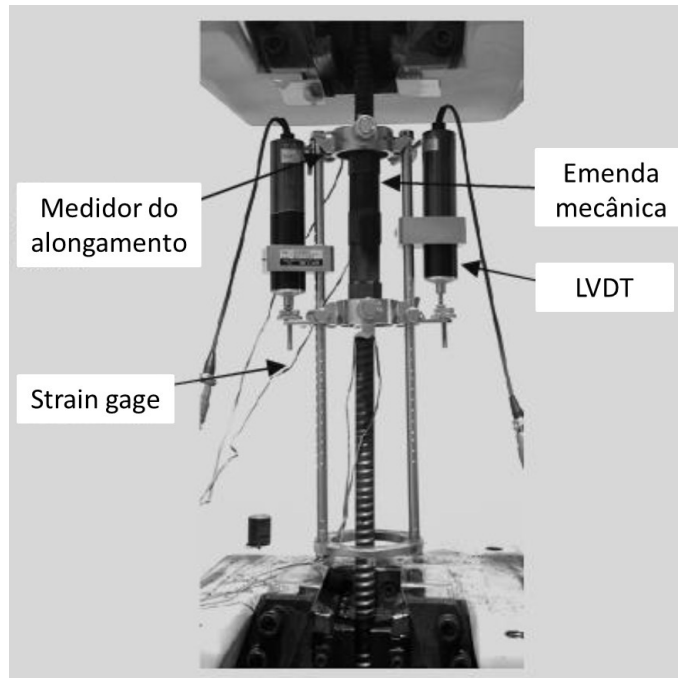


Figura 2-34. Instrumentação das emendas mecânicas ensaiadas.  
Fonte: adaptado de NGUYEN e MUTUSUYOSHI (2015)

KLIMENOV *et al.* (2015) afirmam que o principal parâmetro de qualidade de uma emenda mecânica é a uniformidade de tensões que é verificada quando a carga de ruptura da barra de aço induz a ruptura da luva. De maneira inédita, ele realizou ensaios não destrutivos por meio de radiografias digitais que permitem não somente estimar as propriedades mecânicas das conexões, mas também fornecem uma estimativa de seu desempenho funcional. A análise da curva tensão *versus* deformação dos ensaios mostrou que a deformação elástica está presente no carregamento entre 0 e 480 MPa. No momento em que alcança 375 MPa de tensão no ensaio, a tensão na amostra corresponde a 300 MPa ou 60% da resistência ao escoamento,  $f_y$ , calculada pelo “método offset 0.2%” da barra de controle. Nesse ponto, a deformação plástica é igual a zero.

A Figura 2-35 mostra as radiografias feitas nas amostras com diâmetro externo de 47 (a) e 51 mm (b), respectivamente. Sem a análise radiográfica, seria impossível visualizar a parte interna dos conectores. Com as verificações realizadas, foi possível analisar que a distância entre as barras era 0,704 e 1,6 mm para a luva de 47 mm e 1,6 a 2,05 mm para a luva

de 51 mm de diâmetro. As amostras estudadas demonstraram confiabilidade nos resultados, uma vez que a ruptura ocorreu fora do conector. A análise radiográfica permitiu checar também a qualidade da amostra sugerida, utilizando o ensaio não destrutivo que simplifica o procedimento do controle de qualidade da emenda mecânica. Comprovou-se que ambas as emendas mecânicas ensaiadas poderiam ser utilizadas em todo tipo de construção de grande porte, cuja estrutura é submetida tanto a cargas estáticas quanto dinâmicas.

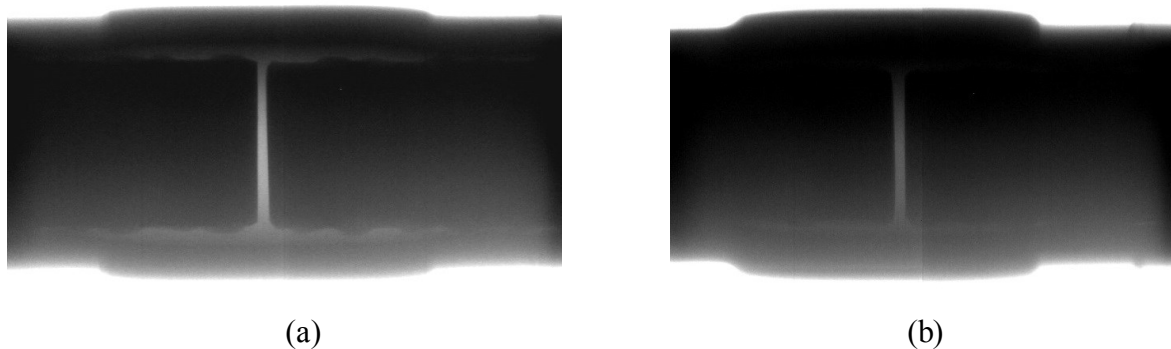


Figura 2-35. Radiografia digital realizada na amostra com diâmetro externo de (a) 47 mm e (b) 51 mm.  
Fonte: KLIMENOV *et al.* (2015)

Para estudar o comportamento de dois tipos distintos de luva grauteada, LING *et al.* (2016) os ensaiaram sob carga incremental de tração em vários comprimentos embutidos e diâmetros. Foram instalados três *strain gages* (SG1, SG2 e SG3) em cada amostra, além de um aqvisor de dados e um computador (Figura 2-36). O SG1 foi instalado na barra de aço a uma distância de  $1d$  (50, 65 e 75 mm) e foi utilizado para medir o alongamento da barra sob as forças de tensão. O SG2 foi instalado transversalmente à emenda no centro da barra de aço e foi utilizado para medir a deformação da própria emenda durante a expansão do graute. Por último, e de mesma importância, o SG3 foi instalado longitudinalmente no centro da emenda e foi utilizado para medir seu alongamento longitudinal quando submetida à carga. Os deslocamentos foram medidos por um transdutor.

Verificou-se que o grau de confinamento gerado na região interna do conector aumenta com a redução de seu diâmetro, melhorando a resistência na ligação e aumentando subsequentemente a capacidade de tração da emenda. Avaliou-se que a capacidade de tração da emenda grauteada do tipo rosqueada é 30% superior em comparação à emenda grauteada do tipo soldável. Com os resultados, formulou-se também um modelo analítico com base na tensão de confinamento expressa em função das dimensões da luva, com a finalidade de prever as capacidades de tração das emendas em uma variação de mais ou menos 10% dos

resultados experimentais, verificando as correlações entre as dimensões da conexão, o esforço de confinamento e a resistência da ligação grauteada.

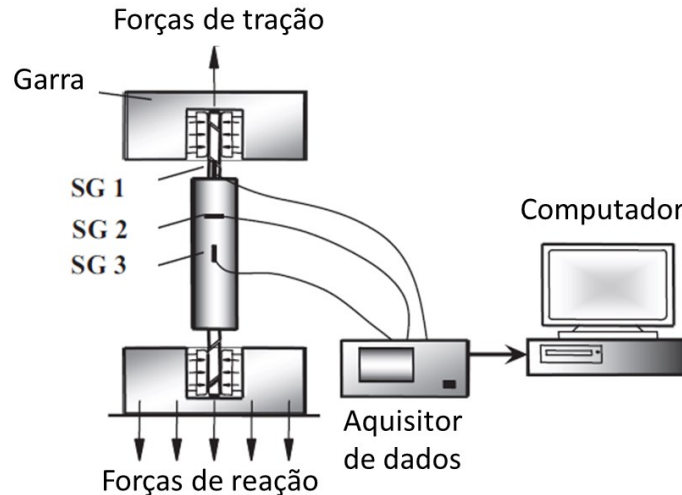


Figura 2-36. Configuração instrumental para a realização dos ensaios.  
Fonte: adaptado de LING *et al.* (2016)

Mais recentemente, SEO *et al.* (2016) efetivaram um estudo com o objetivo de identificar o comportamento da ligação de amostras com luva tipo grauteadas por meio de ensaios com diversos fatores de projeto normalmente considerados como variável, assim como o comprimento do conector em relação ao comprimento da barra de aço inserida dentro dele. Adicionalmente, foi investigado o método de avaliação da resistência à tração em consideração aos efeitos de suporte causados pela cabeça do conector e a tensão entre a barra de aço e o graute.

Realizaram-se três ensaios de resistência à tração em cada amostra de conectores grauteados de 22, 25 e 29 mm de diâmetro. Para o ensaio de avaliação do desempenho da ligação, foi realizado um ensaio unidirecional simples de tração. Como mostrado na Figura 2-37 e Figura 2-38, o ensaio foi idealizado com o objetivo de medir o deslocamento relativo de dois pontos com 20 mm de distância, partindo de ambas as faces externas do conector. Foram instalados dois LVDT's com o intuito de corrigir o deslocamento unilateral que pudesse ocorrer quando submetidos ao carregamento na máquina universal com capacidade de 2000 kN. Ao total, foram instalados oito extensômetros elétricos tipo *strain gages* na barra de aço e no conector para medir a tensão em ambos. Apesar do método de ensaio e de instrumentação não terem sido o ponto focal desta pesquisa, o posicionamento dos extensômetros elétricos na amostra mostrou-se bastante eficiente nas leituras realizadas.

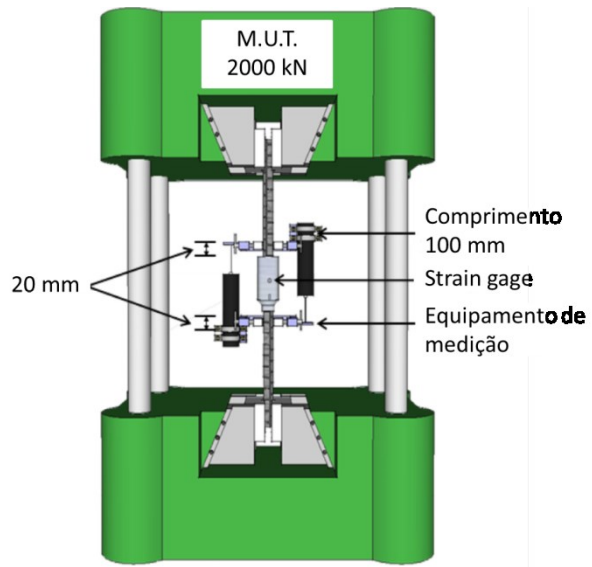


Figura 2-37. Ilustração proposta da instrumentação da luva de emenda.  
Fonte: adaptado de SEO *et al.* (2016)

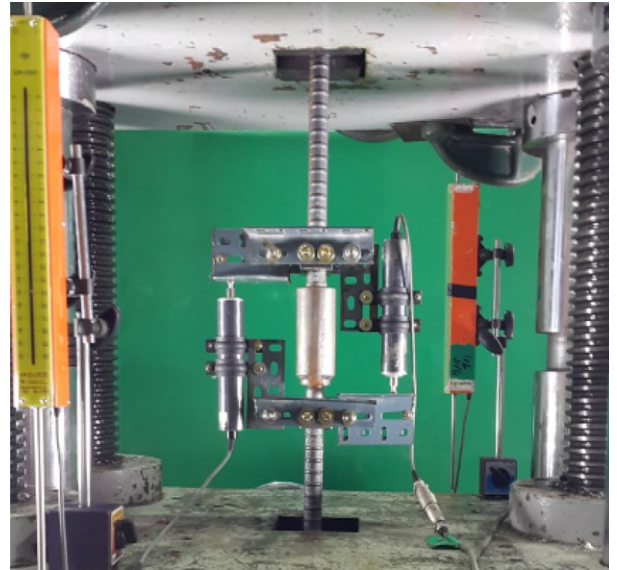


Figura 2-38. Luva grauteada devidamente instrumentada no equipamento universal de tração.  
Fonte: SEO *et al.* (2016)

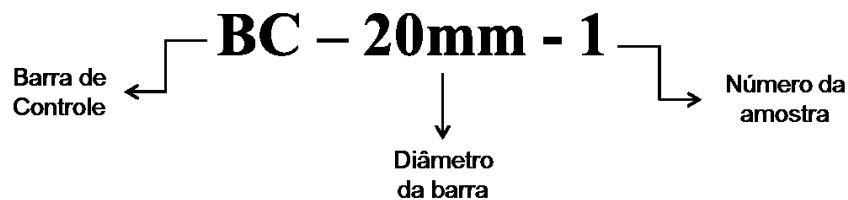


### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Detalhamento do Programa Experimental

O programa experimental desta pesquisa teve por premissa a avaliação dos procedimentos propostos na ISO 15835 (2009) à luz dos procedimentos nacionais da ABNT NBR 8548 (1984), com instrumentação adaptada segundo indicações constantes em HABER *et al.* (2015) e NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015), para emendas mecânicas de barras de aço LENTON com luvas de rosca cônica e parafusadas.

Os ensaios de caracterização das barras de aço antes de emendadas, denominadas como “barras de controle”, retiradas de um mesmo lote de produção, foram procedidos no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia (IME), no município do Rio de Janeiro. A nomenclatura de cada amostra pode ser visualizada abaixo, onde “BC” corresponde à barra de controle, o número seguinte ao diâmetro da barra (20 ou 25 mm), e o último caractere ao número da amostra ensaiada.



A segunda parte do programa experimental e objeto principal desta pesquisa foi composta pelos ensaios de resistência à tração e deslizamento dessas mesmas barras emendadas mecanicamente e foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A nomenclatura das amostras foi definida seguindo as premissas de que “RC” corresponde à luva de rosca cônica e “PAR” à luva parafusada, ambas sucedidas pelo diâmetro da barra de aço (20 e 25 mm) e, posteriormente, pelo número da amostra ensaiada.



Face ao objetivo deste trabalho de analisar e comparar, de maneira abrangente, o comportamento das barras emendadas por luvas frente a diferentes procedimentos de ensaio e instrumentação descritos na literatura nacional e internacional, três métodos de ensaio distintos foram empregados nos referidos ensaios das barras emendadas.

Os dois tipos de emendas mecânicas por avaliar foram escolhidos pelo uso recente no Brasil e por serem, atualmente, dos tipos mais especificados em projetos estruturais como solução para emendas mecânicas de barras de aço das estruturas de concreto armado em todo o mundo. Da mesma maneira, os diâmetros das barras emendadas, 20 mm e 25 mm, foram escolhidos por serem de uso comum e onde o comprimento de emenda por traspasse passa a ser de tal magnitude que a emenda mecânica, com luvas, começa a ser promissor, segundo consenso do meio técnico nacional.

### **3.1.1. Amostragem**

Seja para os ensaios das barras de controle (barras sem emenda mecânica) ou para os ensaios dessas barras com a presença das luvas de emenda, a amostragem representativa de cada tipo de luva, diâmetro e método de ensaio, foi composta por três amostras, de acordo com as prescrições das normas Brasileira ABNT NBR 7480 (2007) e internacional ISO 15630 (2010).

Por meio da metodologia proposta pela ABNT NBR 6152 (2002), foram ensaiadas seis barras de aço tipo CA-50, sendo três de 20 mm e outras três de 25 mm de diâmetro, de maneira isolada, com a finalidade de caracterizá-las com relação ao seu alongamento, além de verificar se estavam de acordo com os valores mínimos da resistência ao escoamento,  $f_y$ , e limite de resistência,  $f_{st}$ , impostos pela ABNT NBR 7480 (2007) e avaliar a deformação máxima da barra de aço.

Às barras emendadas, foram realizados três ensaios para cada diâmetro, tipo de luva e método empregado, totalizando trinta e seis ensaios, que tiveram como finalidade medir a resistência à tração e o deslizamento das amostras com emendas mecânicas. Apesar de a norma brasileira ABNT NBR 8548 (1984) não especificar o parâmetro de deslizamento em seu escopo, este foi medido em todos os ensaios.

### **3.1.2. Equipamentos de ensaio e instrumentos de medição**

Em razão dos ensaios terem sido realizados em duas etapas e em locais distintos, utilizaram-se duas máquinas universais de ensaios, sendo uma delas da marca brasileira CONTENCO (IME) e a outra da marca alemã HECKERT (UNICAMP), ambas com

capacidade de 1000 kN. Para a instrumentação das amostras relacionadas com a presente pesquisa, foram utilizados instrumentos de medição, conforme listagem:

- Aquisitor de dados portátil da marca VISHAY, modelo P3 *Strain Indicator and Recorder Manual*, que possui um total de quatro canais de recepção de dados para a coleta de dados dos ensaios das barras de controle (IME);
- Aquisitor de dados da marca *Micro Measurement System 5100*, que possui um total de 20 canais de recepção de dados para a coleta de dados dos ensaios das barras emendadas (UNICAMP);
- Extensômetro elétrico tipo *strain gage* da marca KYWOA ELETRONIC INSTRUMENTS, modelo KFGS-5-120-C1-11L1M2R, que forneceu leituras de deformação;
- Transdutores com mostrador de 10 e 20 mm da marca KYWOA ELETRONIC INSTRUMENTS, tipo Peacock (*Dial Indicator Linear Transducer*), que forneceram medidas de deslizamento entre a barra e a luva de aço nos ensaios dos Métodos 1 e 2;
- Transdutor de 100 mm da marca *Micro Measurement*, que forneceu leituras de deslocamentos entre a barra e a luva nos ensaios do Método 3.

Foi desenvolvido um roteiro de instrumentação das amostras que foram ensaiadas, contendo o tipo de equipamento e sua função em relação ao fornecimento das leituras. Esse roteiro permitiu a realização de projetos no sistema de aquisição de dados para cada ensaio a ser executado, facilitando sua realização. A planilha realizada pode ser observada na Tabela 3-1.

Tabela 3-1. Planilha de orientação para instrumentação das amostras.

Fonte: Autor

<b>Equipamento de medição</b>	<b>Amostra</b>	<b>Capacidade</b>	<b>Função</b>
Transdutor Individual-1	Barra emendada (Métodos 1 e 2)	20 mm	Leituras de deslizamento
Transdutor Individual -2	Barra emendada (Métodos 1 e 2)	10 mm	Leituras de deslizamento
Extensômetro Elétrico-1	Barra de controle e barra emendada	5 mm	Leituras de deformação da barra
Extensômetro Elétrico -2	Barra de controle e barra emendada	5 mm	Leituras de deformação da barra
Extensômetro Elétrico-3	Barra emendada	5 mm	Leituras de deformação da luva
Extensômetro Elétrico-4	Barra emendada	5 mm	Leituras de deformação da luva
Transdutor Grupo-1	Barra emendada (Método 3)	100 mm	Leituras de deslizamento
Transdutor Grupo-2	Barra emendada (Método 3)	100 mm	Leituras de deslizamento
Transdutor Grupo-3	Barra emendada (Método 3)	100 mm	Leituras de deslizamento

### 3.2. Ensaios de caracterização das barras sem emenda (barras de controle)

#### 3.2.1. Metodologia experimental

Para a realização destes ensaios, utilizou-se uma máquina universal de ensaios com capacidade de 1000 kN (Figura 3-1), com controle automático de carregamento: CPA (Carregamento Progressivo Automático).

Os ensaios foram baseados na norma brasileira ABNT NBR 6152 (2002) e internacional ISO 15630 (2010) que, basicamente, possuem o mesmo escopo e consistem em agarrar as barras de aço em ambos os lados e tracioná-la até sua ruptura, realizando todas as leituras necessárias. Por ser um ensaio de simples operação e realização, as barras de aço foram fixadas na referida máquina por meio de garras do tipo cunha, de maneira que o esforço fosse aplicado o mais axialmente possível, carregando-as até sua ruptura.

A norma nacional ABNT NBR 8548 (1984) especifica que a barra de aço deve ser separada em três segmentos distintos, devendo-se avaliar o desempenho mecânico de barra isolada de comprimento  $l_1$ , cuja dimensão total foi de 1000 mm (dimensão útil de 700 mm), para todas as amostras, como mostrado na Figura 3-2.



Figura 3-1. Máquina universal de tração utilizada nos ensaios das barras de controle.  
Fonte: Autor

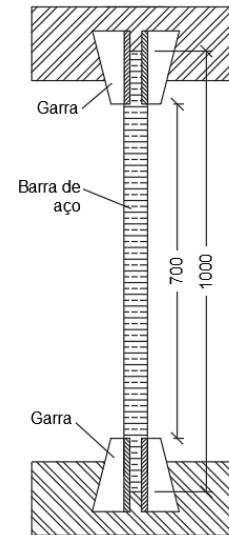
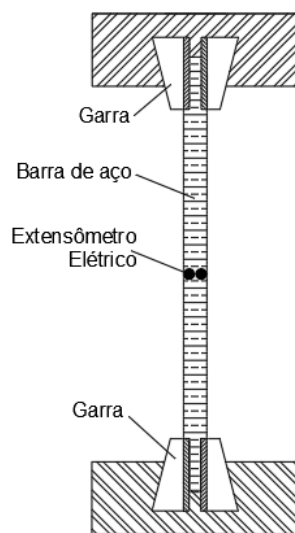


Figura 3-2. Dimensão das barras de controle  
Fonte: adaptado da ABNT NBR 8548 (1984)

### 3.2.2. Instrumentação

A instrumentação das barras de controle foi realizada instalando-se dois extensômetros elétricos exatamente no centro das barras, em lados opostos, e no sentido longitudinal, com a finalidade de medir a deformação da barra de aço neste ponto central (Figura 3-3). Ambos os extensômetros estavam conectados a um aquisitor de dados portátil (Figura 3-4), cujas leituras foram realizadas concomitantemente ao sistema funcional da máquina universal de tração (Figura 3-5).



(a)



(b)

Figura 3-3. Instrumentação das barras de controle. (a) Localização dos extensômetros elétricos; (b) Detalhe da aplicação dos extensômetros elétricos no centro da barra.

Fonte: Autor



Figura 3-4. Aquisitor de dados das leituras dos extensômetros elétricos.

Fonte: Autor

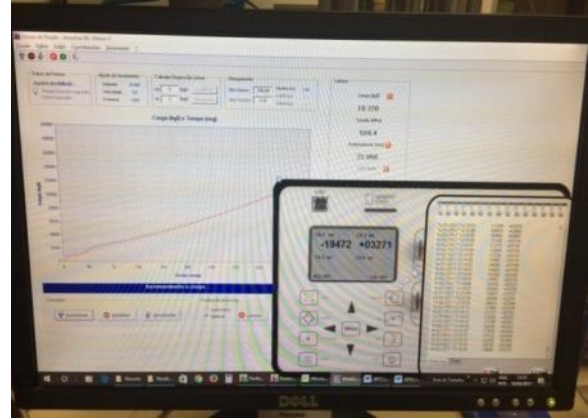


Figura 3-5. Imagem das leituras das deformações de uma barra de controle e dos extensômetros elétricos.

Fonte: Autor

### 3.3. Ensaio principais: barras com emendas mecânicas

#### 3.3.1. Metodologia experimental

Com a finalidade de verificar o desempenho da emenda, sua capacidade, seus dispositivos, detectar possíveis dificuldades, além de analisar o melhor posicionamento da instrumentação, foram executadas quatro amostras preliminares, aqui denominadas ensaios exploratórios, com o objetivo de orientar o campo da experimentação para os ensaios principais. Os resultados e análises dos referidos ensaios podem ser verificados no Apêndice A.

A partir deles, foram estabelecidas outras variáveis para os ensaios principais, verificando suas relevâncias para assim poder avaliar melhor o desempenho da emenda. Também, a partir de problemas e dificuldades observadas durante a execução dos ensaios exploratórios, foram alterados outros detalhes como a localização da inserção dos extensômetros elétricos nas barras de aço e o desenvolvimento de um aparato específico para a determinação do parâmetro de deslizamento com precisão.

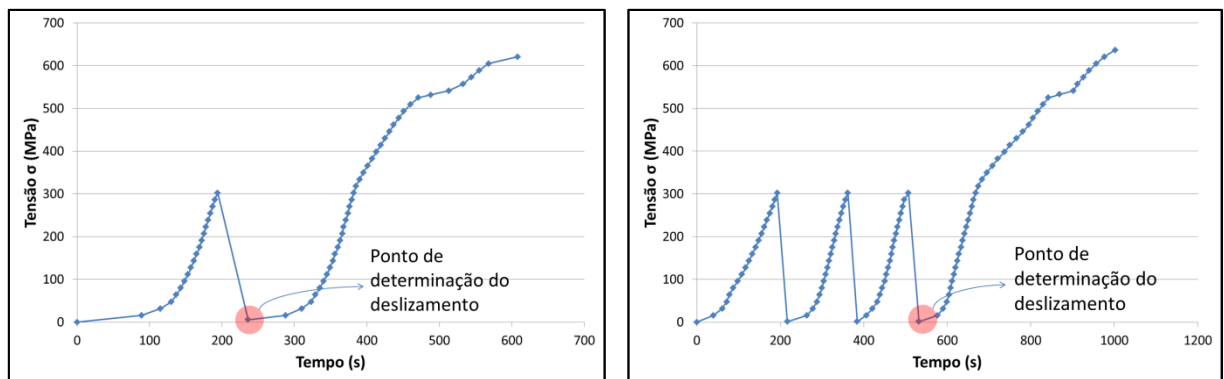
Como informado e com o intuito de verificar se haveria distinção nos resultados, para os ensaios principais foram empregados três métodos de ensaio distintos, com destaque para as diferenças entre normatização empregada, ABNT NBR 8548 (1984), ISO 15835 (2009) e DS-G-6647-029202 (2011) e os números de ciclos de carregamento para obtenção do deslizamento (1 ou 3 ciclos), cujo detalhamento pode ser verificado na Tabela 3-2.

Tabela 3-2. Procedimentos de ensaio aplicados às barras emendadas mecanicamente.

Fonte: Autor

Parâmetro	Método 1	Método 2	Método 3
Resistência à tração	ABNT NBR 8548 (1984)	ISO 15835 (2009)	ISO 15835 (2009)
Deslizamento	Adaptação de DS-G-6647-029202 (2011) com aplicação de ciclo único de carga	ISO 15835 (2009) com aplicação de três ciclos de carga	ISO 15835 (2009) com aplicação de três ciclos de carga

Para a aferição do parâmetro deslizamento relativo entre barra e emenda, neste trabalho foi adotada a recomendação da ISO 15835 (2009), adaptada pela DS-G-6647-029202 (2011), que estabelece o limite máximo de deslizamento de 0,1 mm. A aferição deste parâmetro ocorreu ao final de um ciclo de carga (Método 1) ou ao final de três ciclos de carga (Métodos 2 e 3) da barra emendada (Figura 3-6a e Figura 3-6b, respectivamente). Em cada ciclo, a amostra foi carregada até a tensão nominal de serviço especificada para a barra de aço emendada (300 MPa, no caso das barras desta pesquisa) e, então, descarregada.



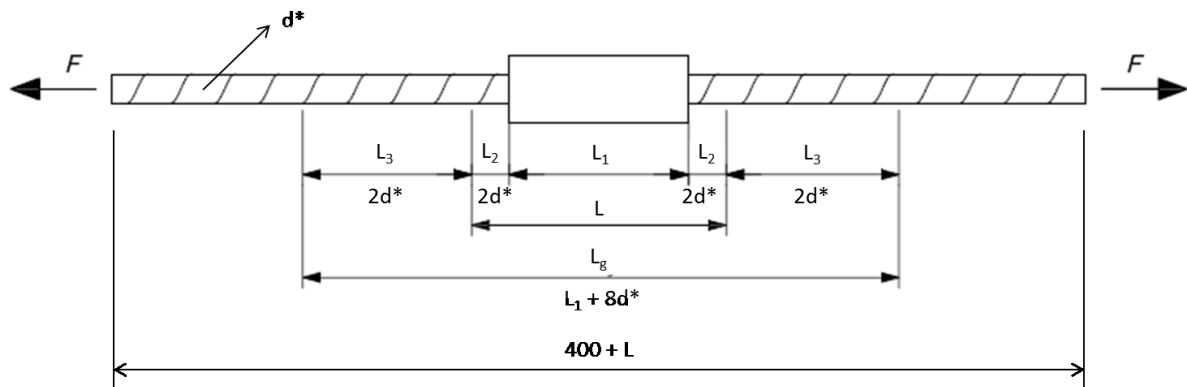
(a)

(b)

Figura 3-6. Esquema dos ciclos de carga para determinação do deslizamento,

Fonte: (a) modificado da DS-G-6647-029202 (2011) – Método 1 e (b) adaptado da ISO 15835 (2009) - Métodos 2 e 3.

A dimensão das amostras de barras emendadas, segundo recomendação da norma internacional ISO 15835 (2009), ilustrada na Figura 3-7, deve ser calculada em função do diâmetro da barra,  $d$ , a ser emendada. Entretanto, além do diâmetro da barra, considera-se também o comprimento do tipo de luva ( $L_l$ ) a ser avaliada. A Figura 3-8 ilustra as dimensões para as amostras de barras emendadas aplicadas neste trabalho, inclusive o comprimento livre mínimo ( $400 + L$ ), segundo a ISO 15835 (2009).



\* Diâmetro "d" da barra de aço e demais dimensões devem ser tomadas em mm

Figura 3-7. Dimensões da amostra para avaliação de desempenho de emenda mecânica.  
Fonte: modificado da ISO 15835 (2009)

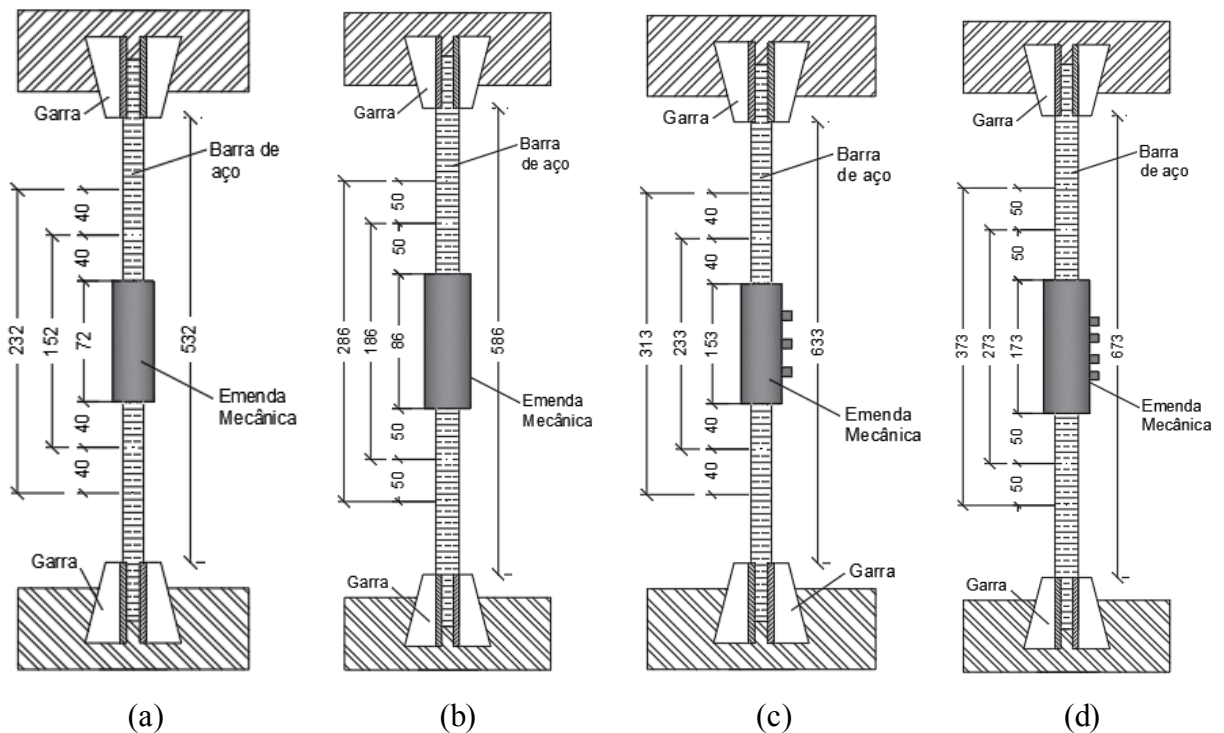


Figura 3-8. Dimensão das amostras. (a) Luva de rosca cônica 20 mm; (b) Luva de rosca cônica 25 mm; (c) Luva parafusada 20 mm e (d) Luva parafusada 25 mm.  
Fonte: ISO 15835 (2009)

### 3.3.2. Instrumentação

Baseado em HABER *et al.* (2015) e NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015), nos ensaios, foram inseridos quatro extensômetros elétricos, sendo dois na barra de aço (Figura 3-9a) a uma distância de  $2d$  das faces externas da luva e dois no centro da própria emenda mecânica (Figura 3-9b), todos no sentido longitudinal, com a finalidade de medir a deformação da barra de aço e compará-la com a deformação da própria luva.



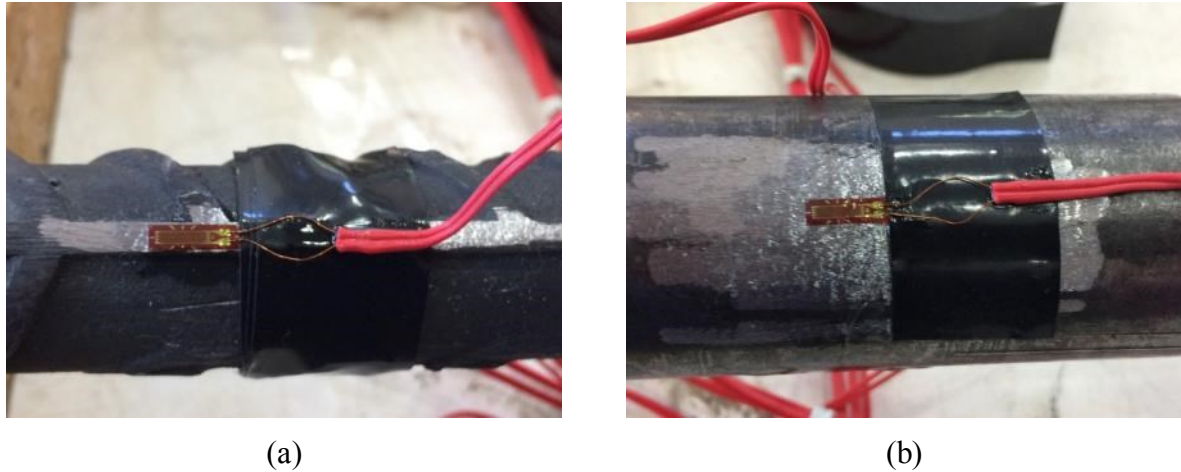


Figura 3-9. Inserção dos extensômetros elétricos (a) na barra de aço e (b) na luva.  
 Fonte: HABER *et al.* (2015) e NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015)

Como instrumentos de medição adicionais e com o intuito de aferir o deslizamento relativo entre barra e luva, em cada ensaio, foram ainda posicionados transdutores de deslocamento. A Tabela 3-3 detalha a instrumentação aplicada para cada método, detalhando a diferença da disposição dos transdutores para obtenção do deslizamento relativo entre barra e emenda, conforme sugestão de HABER *et al.* (2015) ou de NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015).

Tabela 3-3. Instrumentações aplicadas às barras emendadas mecanicamente.

Fonte: Autor

<b>Método 1</b>	<b>Método 2</b>	<b>Método 3</b>
Adaptação de HABER <i>et al.</i> (2015), extensômetros elétricos e transdutores individuais	Adaptação de HABER <i>et al.</i> (2015), extensômetros elétricos e transdutores individuais	Adaptação de NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015), extensômetros elétricos e transdutores dispostos em grupos de três

A Figura 3-10 ilustra o esquema de instrumentação aplicada aos Métodos 1 e 2, cujos transdutores foram dispostos individualmente e conectados diretamente à nervura da barra de aço e à emenda mecânica com o auxílio de um “grampo tipo C” (Figura 3-11). A “agulha” de cada transdutor foi apoiada em uma base metálica localizada no centro da emenda mecânica avaliada (Figura 3-12).

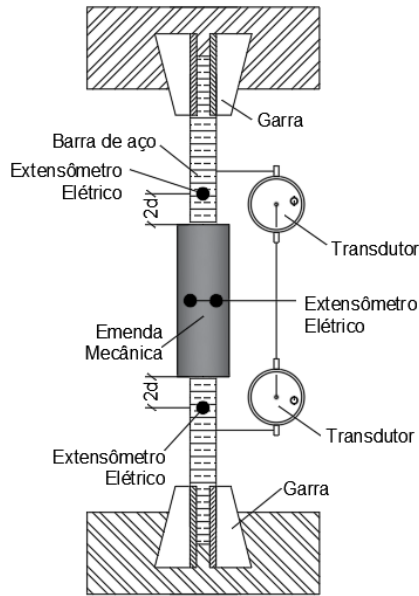


Figura 3-10. Esquema de instrumentação dos Métodos 1 e 2.  
Fonte: Autor



Figura 3-11. Fixação dos transdutores à barra e à emenda mecânica.  
Fonte: Autor



(a)



(b)

Figura 3-12. Ponto de medição do deslizamento relativo.  
Fonte: Autor

É importante frisar que, após a medição do deslizamento, os transdutores foram removidos para evitar qualquer dano devido ao impacto causado no momento da ruptura da amostra. A Figura 3-13a e Figura 3-13b mostram a aplicação real dos transdutores de deslocamento e extensômetros elétricos às luvas rosqueada tipo cônica e parafusada, respectivamente.

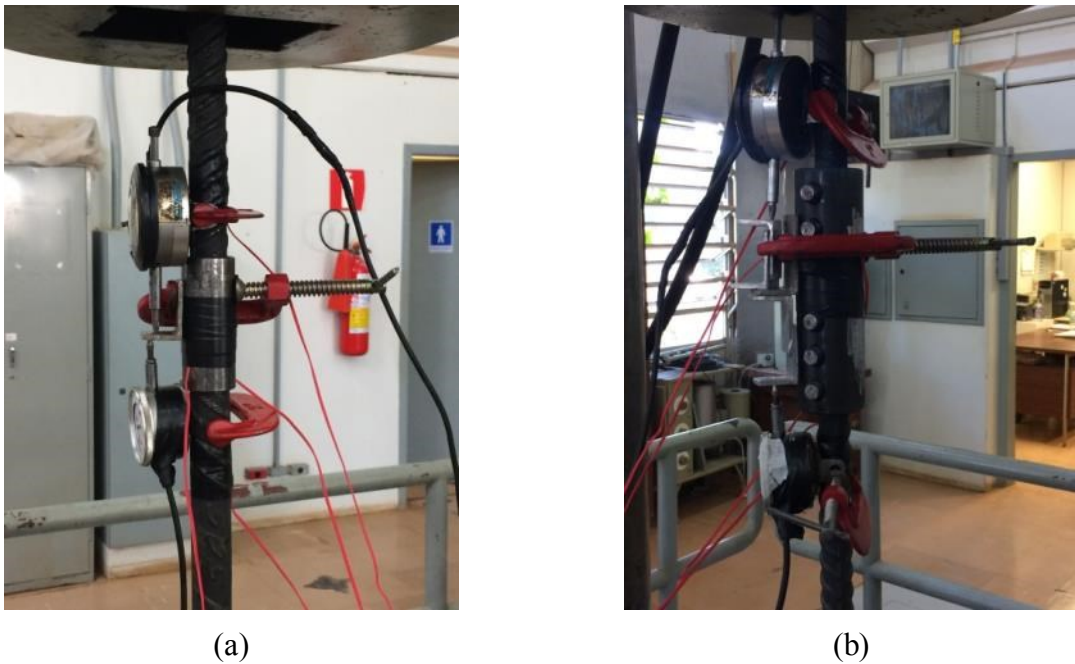


Figura 3-13. Transdutores de deslocamento individuais e extensômetros elétricos aplicados aos ensaios dos Métodos 1 e 2. (a) luva de rosca cônica; (b) luva parafusada.  
Fonte: Autor

A Figura 3-14 apresenta o detalhe tridimensional e suas respectivas funções do aparato utilizado nos ensaios do Método 3, especialmente desenvolvido para a presente pesquisa. A Figura 3-15 mostra o esquema de montagem dos transdutores de deslocamento em grupos de três, atrelados a duas bases triangulares de aço para medição do deslizamento, incluindo a localização da inserção dos extensômetros elétricos, enquanto a Figura 3-16 ilustra as amostras das luvas avaliadas já instrumentadas.

Esclarece-se que, diferentemente do esquema montado para os ensaios dos Métodos 1 e 2, não houve a necessidade de retirar qualquer peça do referido aparato após a determinação do deslizamento, uma vez que ele foi projetado para ensaiar barras de aço de até 32 mm, cuja tensão máxima admissível é de aproximadamente 60 kN.

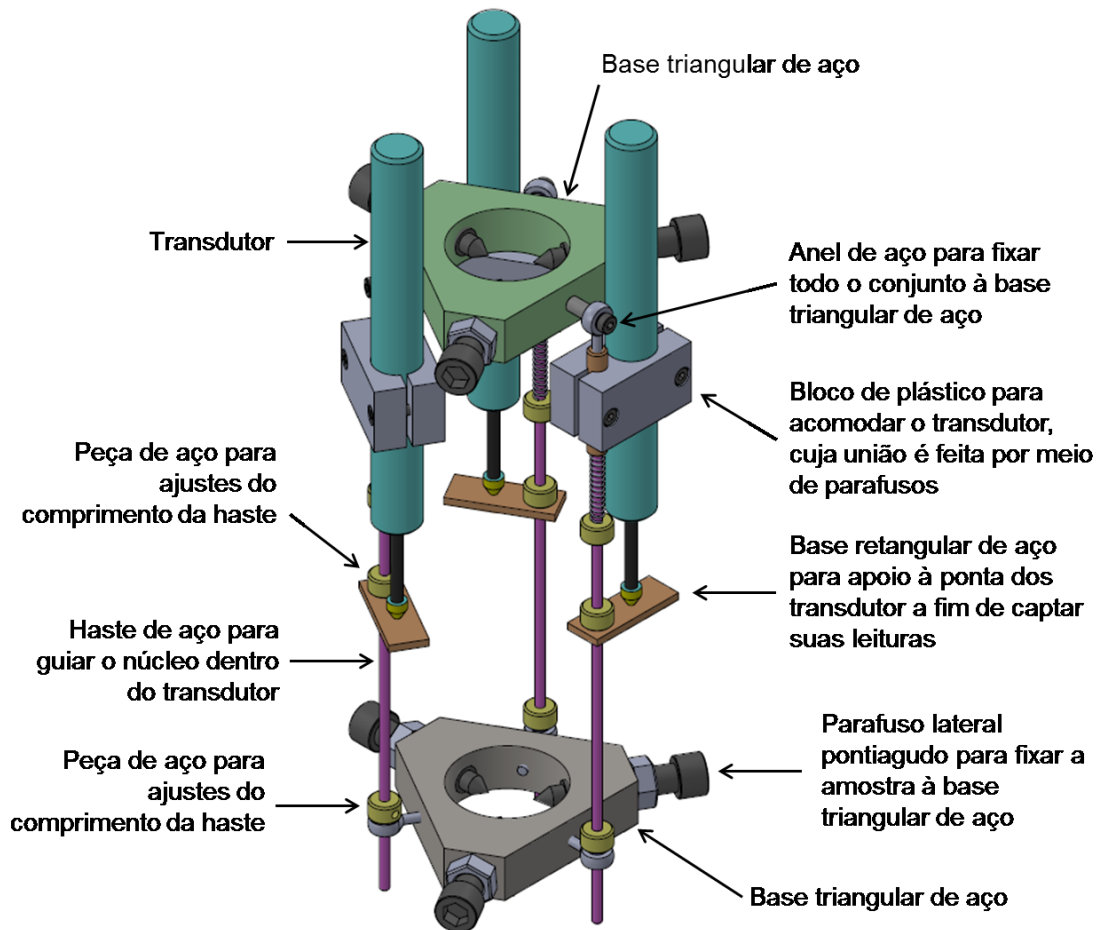
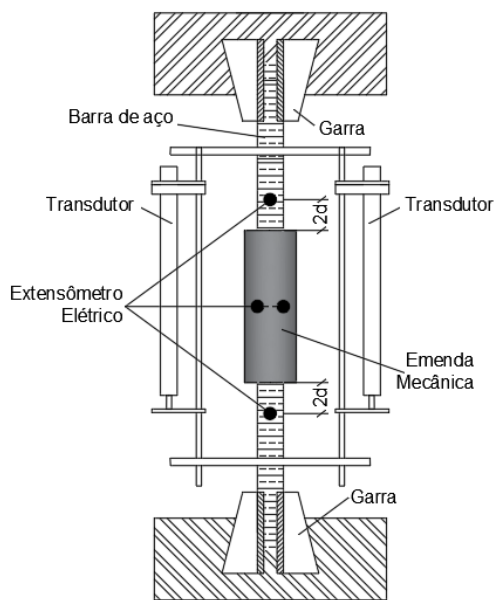


Figura 3-14. Detalhe tridimensional do aparato desenvolvido para os ensaios utilizando o Método 3.  
Fonte: Autor



(a)



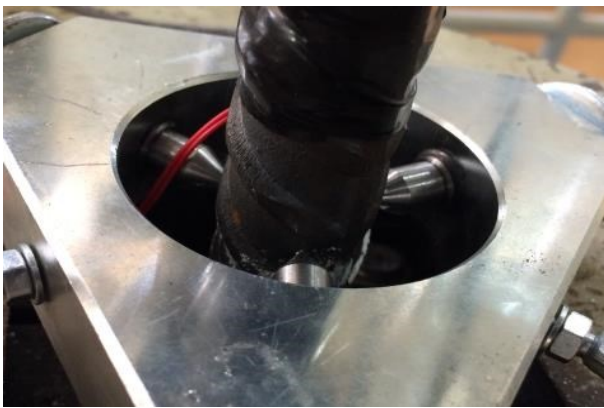
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3-15. Esquema de instrumentação utilizado no Método 3. (a) detalhe da instrumentação; (b) ajuste da base triangular à barra de aço; (c) verificação do nível da base de aço; (d) ajuste do parafuso lateral à barra de aço; (e) parafusos pontiagudos fixando a barra de aço; (f) transdutores inseridos no bloco de plástico; (g) base de apoio para efetuar as leituras do transdutor e (h) inserção da amostra totalmente instrumentada ao equipamento de ensaio.

Fonte: Autor



(a)



(b)

Figura 3-16. Instrumentação aplicada ao Método 3. (a) luva de rosca cônica; (b) luva parafusada.  
Fonte: Autor

Após a determinação do parâmetro deslizamento relativo, as amostras foram carregadas até sua ruptura para a determinação do parâmetro de resistência à tração. Além dos parâmetros de deslizamento e resistência à tração, convém observar que foram obtidas neste trabalho as deformações específicas na barra e na luva. Todos os equipamentos de medição e os extensômetros elétricos estavam conectados a um aquisitor de dados (Figura 3-17) e suas leituras foram registradas pelo sistema operacional da máquina universal de ensaios (Figura 3-18).



Figura 3-17. Aquisitor de dados das leituras dos instrumentos de medição.  
Fonte: Autor

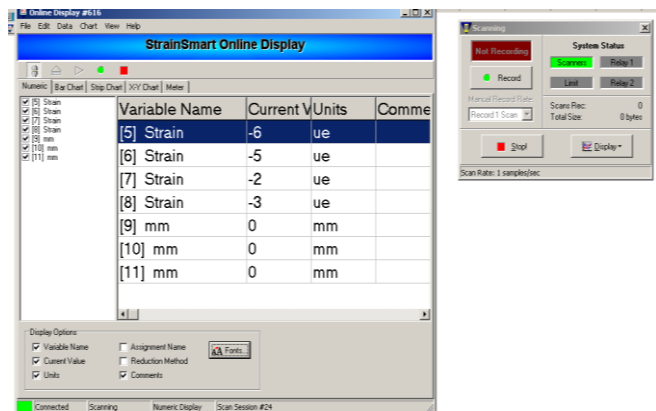


Figura 3-18. Imagem das leituras dos extensômetros elétricos e transdutores durante ensaio.  
Fonte: Autor

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

São analisados e discutidos a seguir os resultados obtidos por meio da investigação experimental. Os resultados são comparados entre si para analisar os métodos de ensaio propostos para a determinação dos parâmetros de resistência à tração das barras, com e sem emenda mecânica, além do parâmetro deslizamento e de toda a instrumentação utilizada.

### 4.1. Ensaio de caracterização das barras sem emenda (barras de controle)

#### 4.1.1. Resultados experimentais

Foram realizados seis ensaios de caracterização para as barras de controle, sendo três para barras de 20 mm e outros três para barras de 25 mm. Todos eles analisaram os parâmetros de alongamento, resistência ao escoamento,  $f_y$ , e limite de resistência,  $f_{st}$ . A Tabela 4-1 mostra os resultados obtidos para os referidos ensaios, sendo que “BC” corresponde à barra de controle, o número seguinte ao diâmetro da barra (20 ou 25 mm) e o último caractere ao número da amostra ensaiada.

Tabela 4-1. Resultados dos ensaios das barras de controle.  
Fonte: Autor

Amostra	Alongamento (%)	$f_y$ (MPa)	$f_{st}$ (MPa)
BC-20mm-1	10,3	555	659
BC-20mm-2	9,6	555	655
BC-20mm-3	10,2	540	671
BC-25mm-1	10,4	545	638
BC-25mm-2	9,8	542	663
BC-25mm-3	8,7	550	716

#### 4.1.2. Análises dos resultados

A Figura 4-1 e Figura 4-2 apresentam a típica evolução das deformações específicas, em função da tensão, nas barras de controle empregadas nesta pesquisa. Observa-se o comportamento análogo das barras de ambos os diâmetros até sua ruptura, como previsto e especificado pelo fabricante de aço.

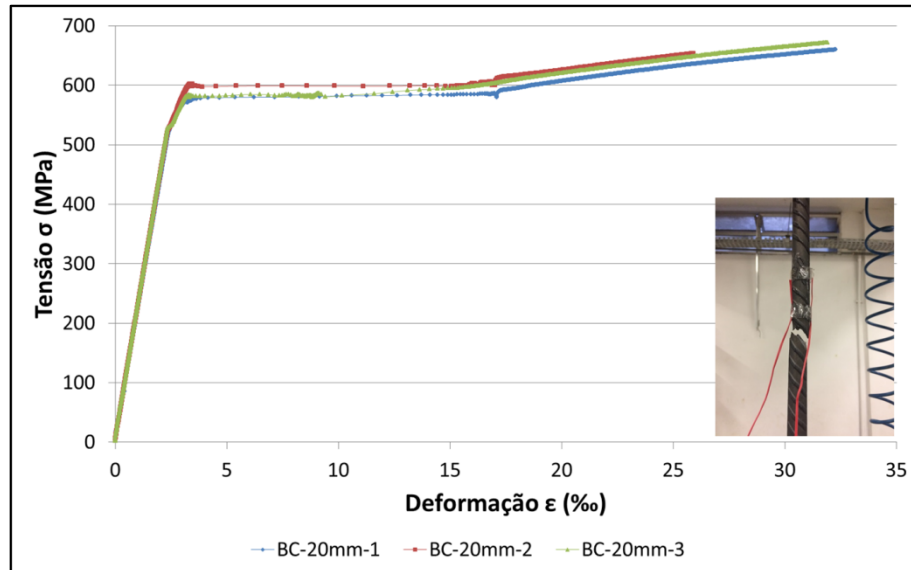


Figura 4-1. Curva tensão *versus* deformação das barras de controle de 20 mm.  
Fonte: Autor

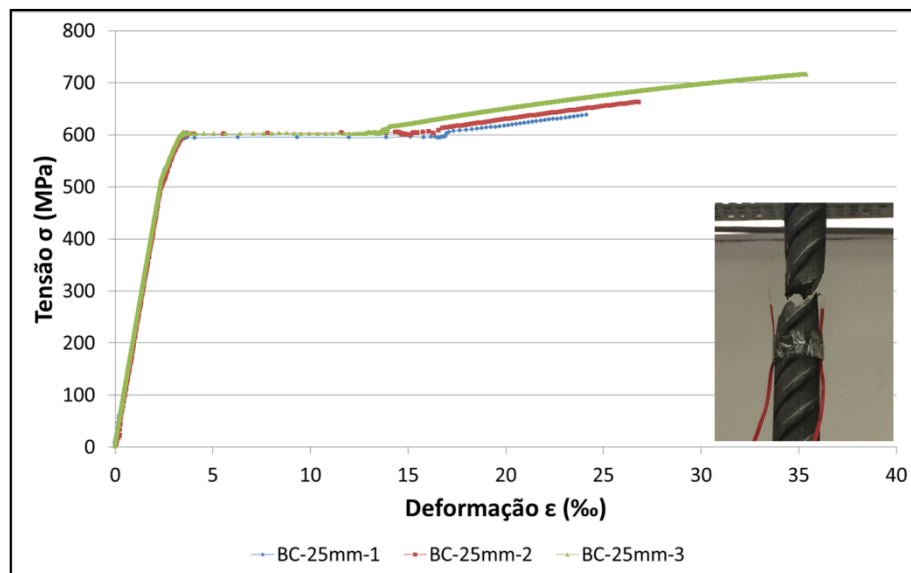


Figura 4-2. Curva tensão *versus* deformação das barras de controle de 25 mm.  
Fonte: Autor



Nota-se que todas as amostras das barras de controle, para ambos os diâmetros avaliados (20 e 25 mm), atingiram a resistência ao escoamento,  $f_y$ , mínimo de 500 MPa, assim como limite de resistência,  $f_{st}$ , de 540 MPa e o alongamento de 8%, todos os valores estabelecidos pela ABNT NBR 7480 (2007). A Figura 4-3 ilustra o detalhe de uma das barras de controle após o ensaio, onde é possível observar a ocorrência da ruptura diagonal no mesmo sentido da nervura da barra, como esperado. A Figura 4-4 e Figura 4-5 mostram que os locais de ruptura de todas as barras foram distintos.

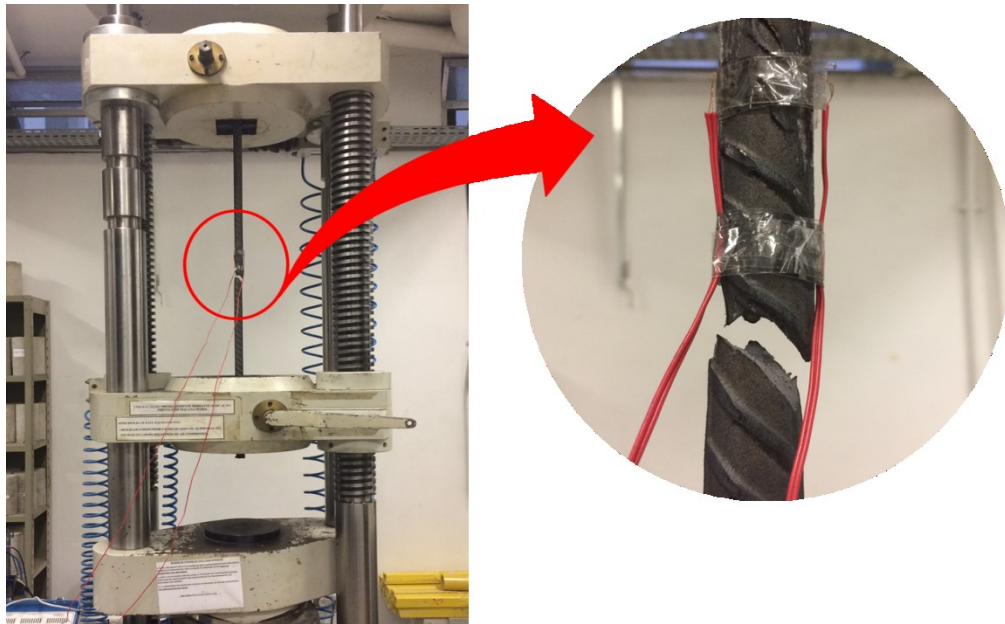


Figura 4-3. Detalhe da ruptura da barra de controle após ser submetido ao ensaio de resistência à tração.  
Fonte: Autor



Figura 4-4. Barras de controle de 20 mm após ensaio.  
Fonte: Autor



Figura 4-5. Barras de controle de 25 mm após ensaio.  
Fonte: Autor

## 4.2. Ensaio principais: barras com emendas mecânicas

### 4.2.1. Resultados experimentais

Foram realizados trinta e seis ensaios de resistência à tração (resistência ao escoamento,  $f_y$ , e limite de resistência,  $f_{st}$ ) e deslizamento em barras emendadas por luvas, sendo três para cada diâmetro, tipo de luva e método empregado.

A nomenclatura das amostras foi definida seguindo as premissas de que “RC” corresponde à luva de rosca cônica e “PAR” à luva parafusada, ambas sucedidas pelo diâmetro da barra de aço (20 e 25 mm) e, posteriormente, pelo número da amostra ensaiada.

A Tabela 4-2 apresenta os resultados da resistência ao escoamento,  $f_y$ , e o limite de resistência,  $f_{st}$ , das barras emendadas mecanicamente por luvas de rosca cônica e parafusadas, além do valor do deslizamento relativo entre barra de aço e a emenda mecânica e a deformação máxima encontrada tanto na barra de aço quanto na própria emenda, a fim de compará-las. A Figura 4-6 ilustra todas as amostras após serem submetidas aos ensaios supracitados.

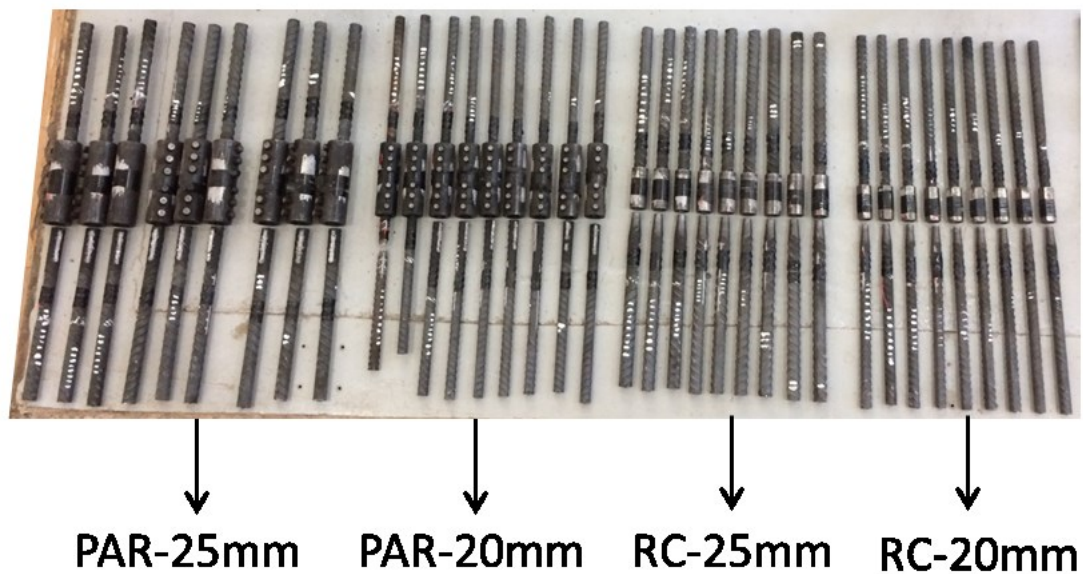


Figura 4-6. Vista geral das amostras das luvas após a execução de todos os ensaios.

Fonte: Autor

Tabela 4-2. Resultados dos ensaios em barras de aço emendadas por luva.

Fonte: Autor

Amostra	Método de ensaio	$f_y$ (MPa)	$f_{st}$ (MPa)	Deslizamento (mm)	Deformação na ruptura (%)	
					Barra	Luva
RC-20mm-1	Método 1	528	641	0,10	3,21	2,18
RC-20mm-2		536	648	0,10	3,64	2,30
RC-20mm-3		535	641	0,02	3,80	2,26
RC-20mm-4	Método 2	541	646	0,11	3,48	2,18
RC-20mm-5		541	633	0,02	3,23	2,13
RC-20mm-6		535	630	0,12	3,53	2,13
RC-20mm-7	Método 3	541	635	0,03	3,48	2,23
RC-20mm-8		540	637	0,02	3,13	2,14
RC-20mm-9		533	637	0,00	3,38	2,22
RC-25mm-1	Método 1	565	702	0,03	3,54	2,49
RC-25mm-2		553	688	0,05	2,91	2,30
RC-25mm-3		570	693	0,01	3,16	2,46
RC-25mm-4	Método 2	566	682	0,03	3,36	2,57
RC-25mm-5		567	677	0,28	3,51	2,42
RC-25mm-6		556	675	0,10	3,30	2,56
RC-25mm-7	Método 3	565	681	0,02	3,80	2,55
RC-25mm-8		565	679	0,01	3,97	2,47
RC-25mm-9		565	674	0,03	3,84	2,16

Tabela 4-2. Resultados dos ensaios em barras de aço emendadas por luva (continua)

Fonte: Autor

Amostra	Método de ensaio	$f_y$ (MPa)	$f_{st}$ (MPa)	Deslizamento (mm)	Deformação na ruptura (%)	
					Barra	Luva
PAR-20mm-1	Método 1	532	621	0,02	3,45	0,95
PAR-20mm-2		535	649	0,07	3,18	1,00
PAR -20mm-3		532	657	0,01	3,60	0,98
PAR -20mm-4	Método 2	535	627	0,05	3,36	1,07
PAR -20mm-5		532	605	0,15	3,48	0,90
PAR -20mm-6		535	653	0,19	3,36	0,91
PAR -20mm-7	Método 3	533	654	0,01	3,05	1,11
PAR-20mm-8		538	641	0,05	3,59	1,03
PAR -20mm-9		616	710	0,02	4,18	0,89
PAR -25mm-1	Método 1	559	670	0,10	4,07	1,00
PAR -25mm-2		560	661	0,10	3,20	0,89
PAR -25mm-3		559	693	0,07	3,44	1,13
PAR -25mm-4	Método 2	558	667	0,07	3,81	1,14
PAR -25mm-5		564	640	0,30	3,39	1,21
PAR -25mm-6		564	704	0,05	3,54	1,29
PAR -25mm-7	Método 3	565	672	0,07	3,62	1,04
PAR -25mm-8		564	642	0,06	3,03	1,03
PAR -25mm-9		556	646	0,06	3,70	1,01

#### 4.2.2. Análises dos resultados

Da mesma forma como identificado nos resultados destes mesmos parâmetros para as barras de controle, nota-se que todas as amostras avaliadas atingiram a resistência ao escoamento,  $f_y$ , mínimo de 500 MPa, assim como o limite de resistência,  $f_{st}$ , de 540 MPa, ambos os valores estabelecidos pela ABNT NBR 7480 (2007). A Figura 4-7 (RC-20mm), Figura 4-8 (RC-25mm), Figura 4-9 (PAR-20mm) e Figura 4-10 (PAR-25mm) ilustram a evolução das deformações específicas, em função da força, nas barras emendadas. As curvas força *versus* deformação de todos os ensaios podem ser conferidas no Apêndice B.

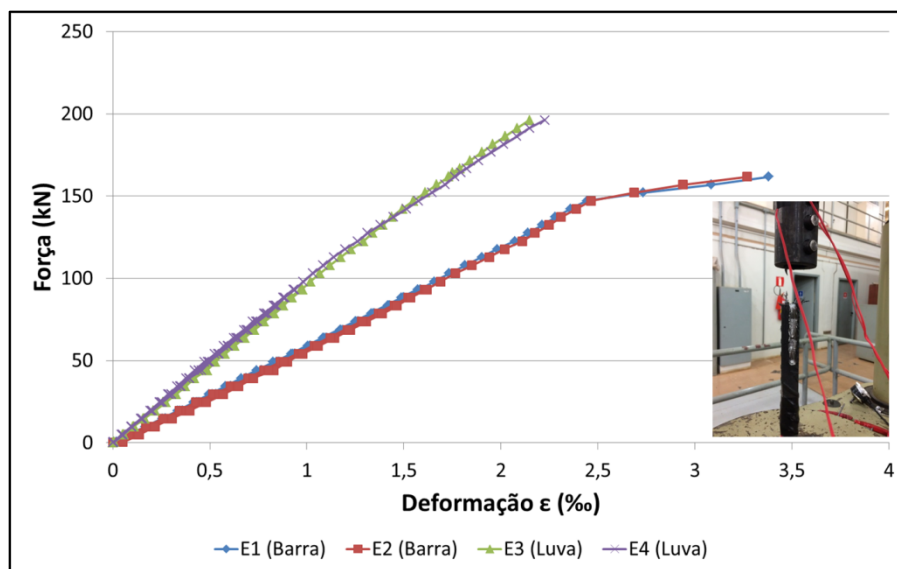


Figura 4-7. Curva força *versus* deformação – RC-20mm.  
Fonte: Autor

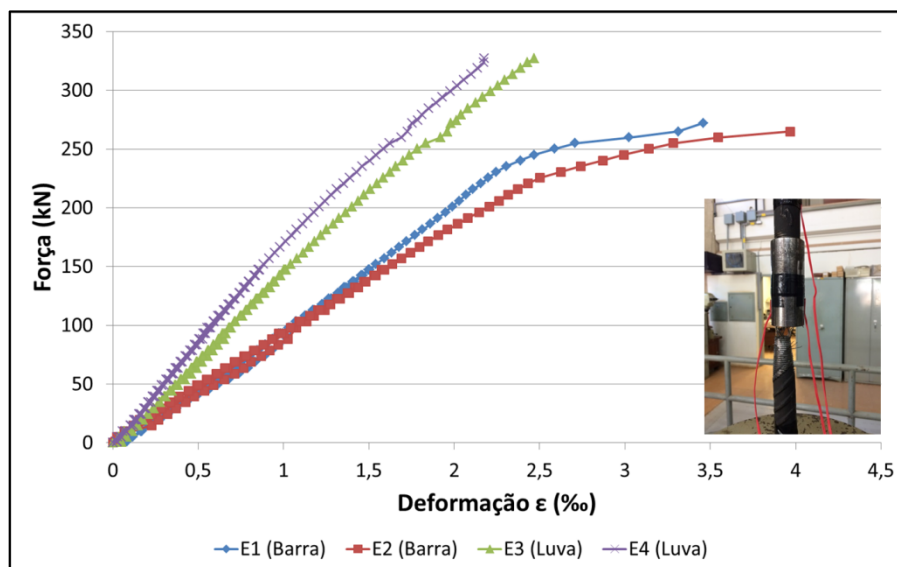


Figura 4-8. Curva força *versus* deformação – RC-25mm.  
Fonte: Autor

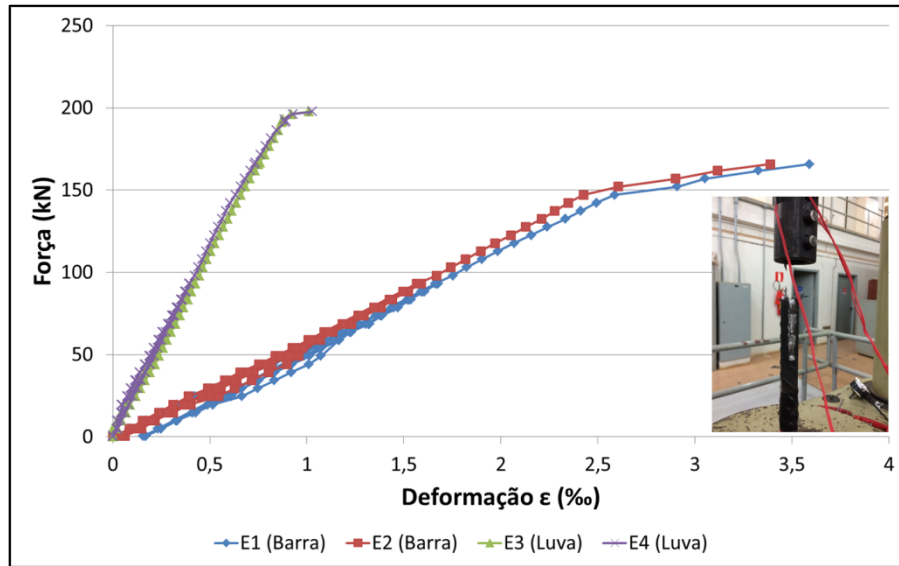


Figura 4-9. Curva força *versus* deformação – PAR-20mm.  
Fonte: Autor

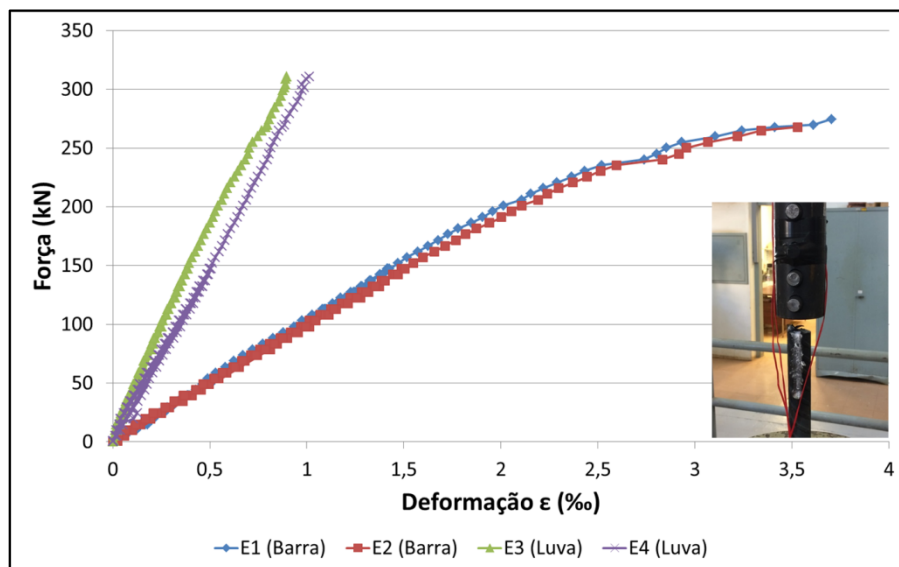


Figura 4-10. Curva força *versus* deformação – PAR-25mm.  
Fonte: Autor

Conforme apresentado na Tabela 4-2, observa-se com clareza nos gráficos acima ilustrados que as barras de aço CA-50 emendadas mecanicamente apresentaram deformações muito similares por se tratar do mesmo material, e estão de acordo com as especificações do fabricante de aço (Arcelormittal). Entretanto, quando esse tipo de aço é comparado com os utilizados na fabricação das luvas de emenda, verifica-se que sua deformabilidade é muito superior, independentemente do tipo de luva utilizada na emenda.

Neste caso, enquanto as luvas de rosca cônica são fabricadas com o aço tipo AISI 1117<sup>23</sup> (20 mm) e AISI 1141<sup>45</sup> (25 mm), a luva parafusada utiliza o aço tipo 8620<sup>67</sup> em seu processo, cujas características estão apresentadas na ASTM A29 (2015). Observaram-se por meio das leituras produzidas pelos extensômetros elétricos inseridos no corpo da luva de emenda que a curva força *versus* deformação das luvas parafusadas tende a ser mais verticalizada quando comparadas às curvas das luvas de rosca cônica. Confrontando diretamente o aço de ambas, observam-se nitidamente na Figura 4-11 que os valores das deformações da luva parafusada são bastante inferiores às luvas de rosca cônica, como previsto.

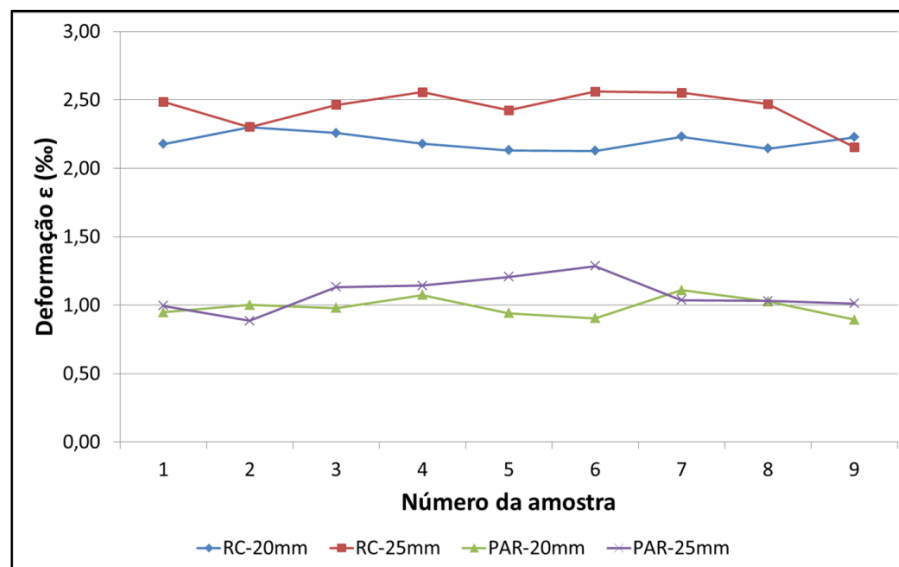


Figura 4-11. Compilação das deformações das amostras ensaiadas das luvas de rosca cônica e parafusadas.  
Fonte: Autor

<sup>2</sup> Composição Química: Carbono (0,14-0,20 %); Manganês (1,00-1,30%); Fósforo (0,04%) e Enxofre (0,08-0,13%)

<sup>3</sup> Propriedades Mecânicas: Resistência ao escoamento (710 MPa); Limite de resistência (938 MPa) e Alongamento (14%);

<sup>4</sup> Composição Química: Carbono (0,37-0,45 %); Manganês (1,35-1,65%); Fósforo (0,04%) e Enxofre (0,08-0,13%);

<sup>5</sup> Propriedades Mecânicas: Resistência ao escoamento (710 MPa); Limite de resistência (938 MPa) e Alongamento (14%);

<sup>6</sup> Composição Química: Carbono (0,18-0,23 %); Manganês (0,70-0,90%); Fósforo (0,035%); Enxofre (0,04%); Silício (0,15-0,35%); Níquel (0,40-0,70%), Cromo (0,40-0,60%) e Molibdênio (0,15-0,25%)

<sup>7</sup> Propriedades Mecânicas: Resistência ao escoamento (833 MPa); Limite de resistência (1157 MPa) e Alongamento (14,3%);

As curvas força *versus* deformação mostram claramente que a ductilidade da luva de aço é superior em relação à barra de aço CA-50, dada a capacidade de deformação de ambas. A partir de tal análise, é possível afirmar que a rigidez na emenda foi superior à da barra. Destaca-se também que, de modo generalizado, apesar de a carga resistida pela barra emendada ser maior ao mínimo especificado pela ABNT NBR 7480 (2007), considera-se que existe ainda uma reserva na força aplicada, portanto não existe a necessidade de se aplicar um fator redutor (a fim de incrementar a segurança) durante a elaboração de um projeto estrutural.

Em relação ao limite de resistência,  $f_{st}$ , obtido nos ensaios, verifica-se a similaridade dos valores encontrados para as barras emendadas quando comparados às respectivas tensões obtidas para as barras de controle, estando todas as amostras de acordo com ABNT NBR 7480 (2007). Isto se deve ao fato de que a emenda mecânica é projetada com uma área crítica superior à da barra de aço com a finalidade de resistir a cargas mais altas.

Cabe destacar que a ruptura das barras emendadas ocorreu, quase que em sua totalidade, na região da emenda, sem afetar, contudo, a integridade das luvas avaliadas. No caso das luvas rosqueadas, a barra é arrancada da luva após rompimento dos frisos da rosca pela combinação de tensões de flexão e cisalhamento. Quanto às luvas parafusadas, verifica-se claramente a ocorrência de ruptura dos parafusos da emenda por cisalhamento. A Figura 4-12 e Figura 4-13 ilustram o modo típico de ruptura observado para as emendas avaliadas.

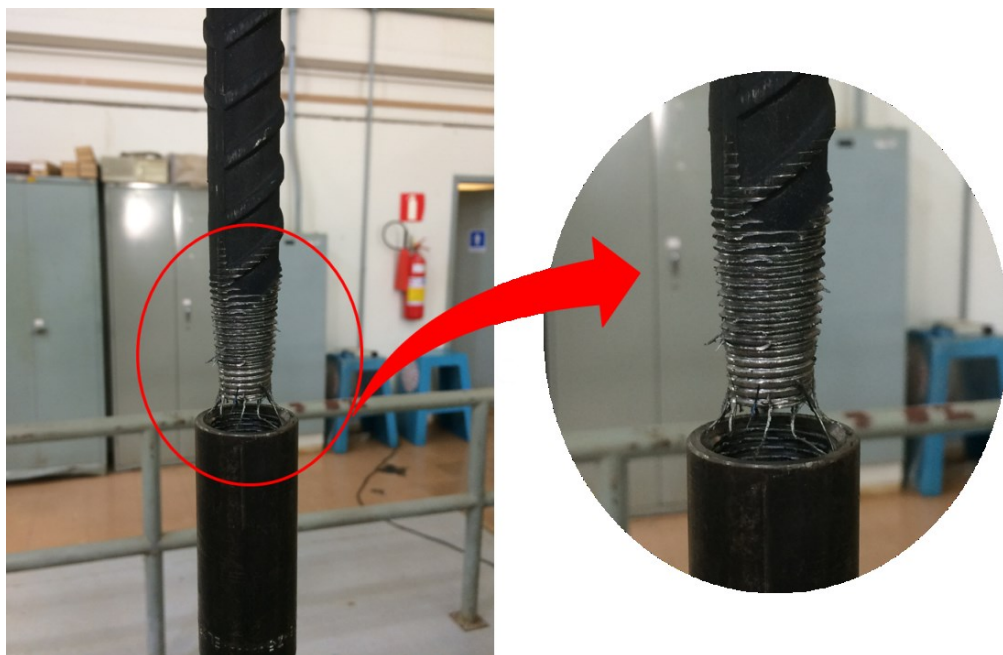


Figura 4-12. Luva de emenda de rosca cônica depois de submetida à ruptura.  
Fonte: Autor



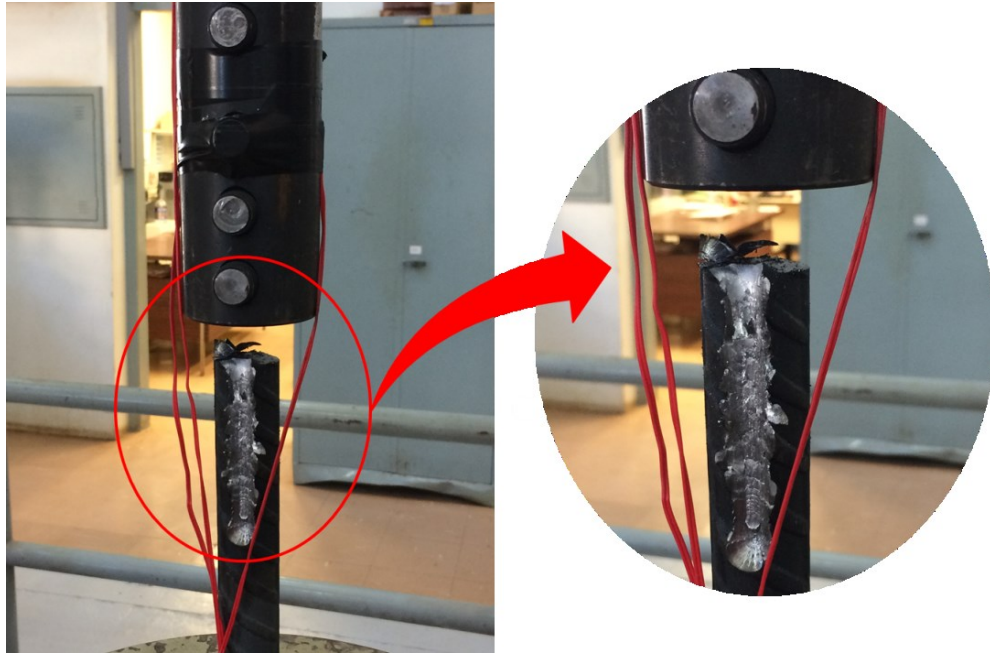


Figura 4-13. Luva parafusada após ruptura dos parafusos por cisalhamento.  
Fonte: Autor

A Figura 4-14 mostra, separadamente, todas as amostras ensaiadas nesta pesquisa. Salienta-se que uma única amostra com este tipo de luva rompeu na região da barra de aço (PAR-20mm-9), cujos resultados da resistência ao escoamento,  $f_y$ , (616 MPa) e do limite de resistência,  $f_{st}$ , (710 MPa), foram, inclusive, acima da média registrada nos ensaios (551 MPa e 641 MPa, respectivamente).



(a)



(b)



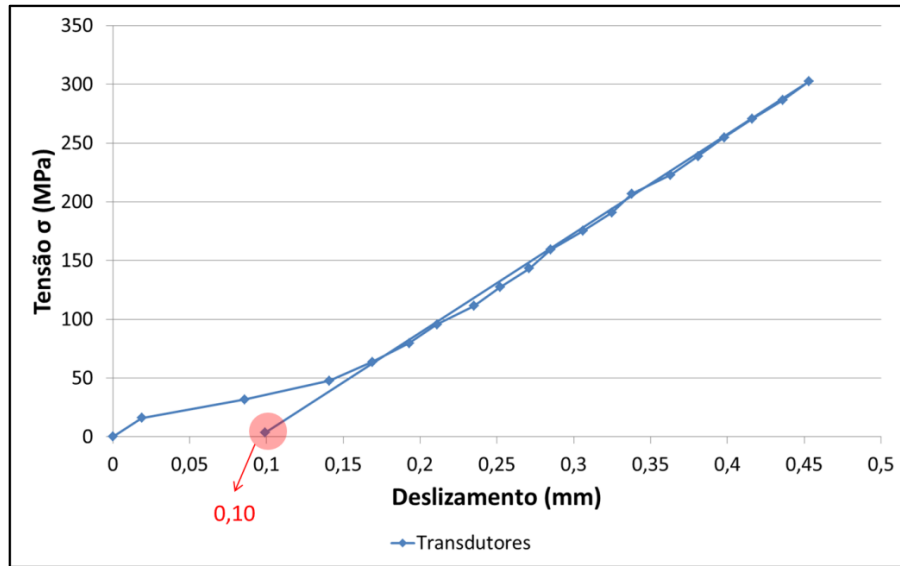
Figura 4-14. Conjunto de amostras das luvas de rosca cônica (a) RC-20mm e (b) RC-25mm e parafusadas (c) PAR-20mm e (d) PAR-25mm após serem submetidas aos ensaios.

Fonte: Autor

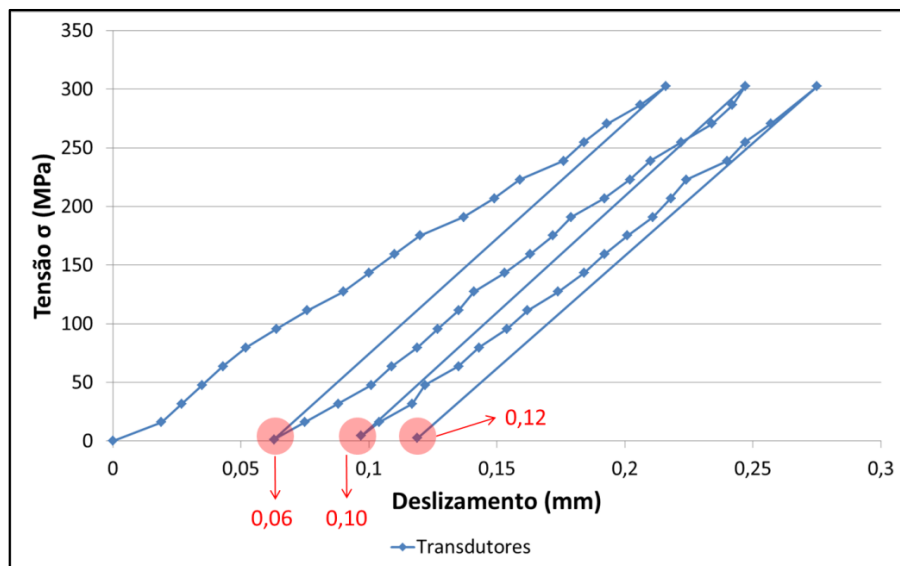
No que tange o parâmetro deslizamento, da maneira como proposto, e com base nas prescrições estabelecidas pela norma internacional ISO 15835 (2009), e no documento interno da Eletrobrás Eletronuclear, DS-G-6647-029202 (2011), 83% das amostras analisadas apresentaram valores de deslizamento inferiores ao limite máximo de 0,1 mm. As amostras que estavam em desacordo com as normas supracitadas tiveram seus procedimentos de ensaio baseados no Método 2 de ensaio, ou seja, utilizaram transdutores individuais para a medição do deslizamento, medido ao final de três ciclos de carregamento.

Quanto ao número de ciclos de carga, antes da medição do valor final do deslizamento, e a forma de instalação dos transdutores para medição deste deslizamento, vale observar o ilustrado na Figura 4-16. Os valores finais de deslizamentos obtidos, muito diferentes, evidenciam, claramente, eventuais problemas em relação aos métodos de ensaio em avaliação.

Esta barra avaliada pelo Método 1 de ensaio (Figura 4-16a), apresentou 0,10 mm de deslizamento ao final de um ciclo de carregamento. Pelo Método 2 de ensaio, barra similar (Figura 4-16b) apresentou deslizamentos de 0,05 mm ao final do primeiro ciclo de carga, 0,10 mm ao final do segundo ciclo e 0,15 mm ao final do terceiro ciclo de carga. Considerando que o tipo de instalação dos transdutores, conectados individualmente à barra emendada, é o mesmo em ambos os métodos, pode-se concluir que este tipo de conexão pode estar sujeito a eventuais movimentações dos transdutores ao final de cada ciclo de carga; o que, logicamente, poderia inviabilizar tanto o Método 1 quanto o Método 2 de ensaio avaliados.



(a)



(b)

Figura 4-15. Evolução do deslizamento relativo entre barra e emenda mecânica tipo RC-20mm (a) Método 1 e (b) Método 2.

A Figura 4-16 pode elucidar a dúvida expressa no parágrafo anterior. O ensaio de barra similar pelo Método 3, empregando aparato especial (Figura 3-14) para medição dos deslizamentos, resultou em valores idênticos de deslizamento (0,02 mm) ao final de cada ciclo de carregamento da barra emendada. Este resultado só seria possível caso não existisse nenhuma movimentação dos transdutores ao final de cada ciclo de carga; o que pode comprovar a eficiência do Método 3 de ensaio proposto.

Quanto ao número de ciclos de carga, a constância nos resultados de deslizamento ao final de cada ciclo ilustrada na Figura 4-16 (0,02 mm) pode indicar a suficiência de apenas

1 ciclo de carga para a obtenção do deslizamento final. Entretanto, esse fato deve ser melhor avaliado em trabalhos futuros, onde outros tipos de emendas mecânicas e outros diâmetros de barras emendadas devem ser ensaiados. As curvas tensão *versus* deslizamento de todos os ensaios podem ser conferidas no Apêndice C.

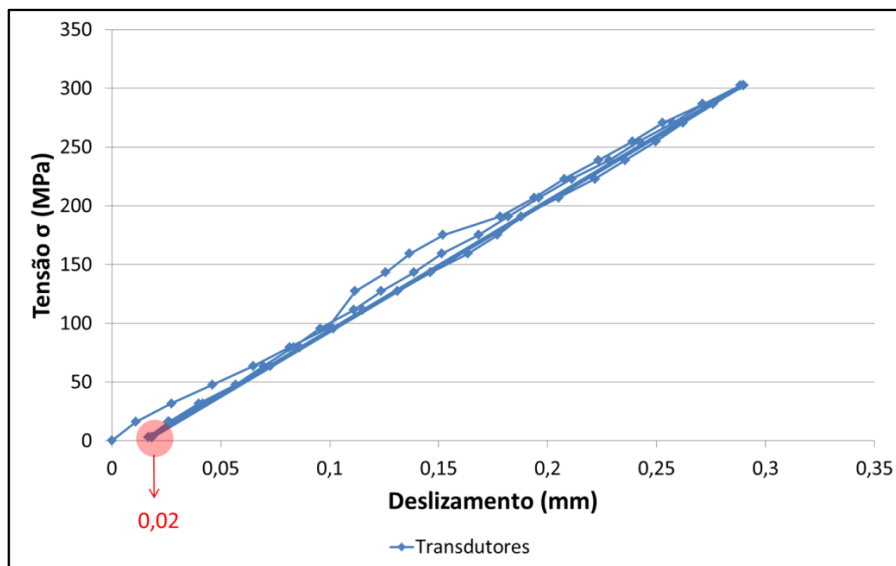


Figura 4-16. Evolução do deslizamento relativo entre barra e emenda mecânica tipo RC-20mm pelo Método 3.  
Fonte: Autor

Apesar de não especificado nas metodologias de instrumentação avaliadas nesta pesquisa, a inserção dos extensômetros elétricos no centro da luva de emenda foi de grande utilidade para medir a deformação do material e verificar se haveria alguma influência na determinação do parâmetro do deslizamento. Em ambos os casos, notou-se que a luva de emenda pouco se deforma durante a realização do ensaio e, conseqüentemente, este valor de deformação pode ser desprezado na avaliação dos resultados dos ensaios, fato confirmado pela Figura 4-17, a qual ilustra que, além da própria emenda, suas faces externas também não foram afetadas, mesmo após o arrancamento brusco da barra de aço.



Figura 4-17. Face externa da (a) luva de rosca cônica e (b) luva parafusada pós-arrancamento da barra de aço.  
Fonte: Autor

Entretanto, a instrumentação da luva pode, uma vez que se trata de ensaios de desempenho da emenda e que a luva é parte importante do sistema, indicar um comportamento não adequado para este elemento durante o ensaio e, desta forma, deve ser mantida em eventual proposta de avaliação de desempenho do sistema de emendas mecânicas de barras de aço para estruturas em concreto armado.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações gerais

Esta pesquisa, com base nos ensaios realizados, pretendeu apresentar de maneira generalizada os tipos de emendas mecânicas disponíveis no mercado nacional, além de abordar em detalhes as mais variadas situações de uso e as pesquisas relacionadas a este tema em algumas universidades nacionais. A realização deste programa experimental pode ser considerada um das pioneiras na execução de ensaios, isolados, de resistência à tração e deslizamento em barras de aço emendadas por luvas no Brasil, uma vez que uma extensa pesquisa bibliográfica foi realizada e nada foi encontrado.

No entanto, vários dos fatores apresentados nesta pesquisa são passíveis de ajustes e aperfeiçoamentos. Reitera-se, mesmo assim, que se procurou apresentar todas as etapas do programa experimental em detalhes com o intuito de possibilidade de subsidiar futuras pesquisas, ensaios e análises correlatas.

Em relação aos objetivos propostos, foi possível avaliar em profundidade e consistência dois dos tipos de emendas mais utilizadas no Brasil. Assim, a dissertação em questão argumenta que, em conformidade com os resultados do programa experimental desenvolvido nesta pesquisa, entende-se que as emendas mecânicas por luvas de rosca cônica e parafusadas estariam aptas a serem utilizadas como solução para prover continuidade e integridade estrutural em construções de concreto armado, uma vez que seu comportamento atendeu a todas as prescrições normativas pré-estabelecidas.

Nesse contexto, enfatiza-se que essas constatações são limitadas ao experimento realizado e aos materiais empregados nesta pesquisa. A generalização das conclusões só é possível com a continuidade dos estudos, envolvendo obviamente outros tipos de luvas de aço disponíveis no Brasil (prensada, rosca paralela, soldável, etc.).

Os dois tipos de emendas mecânicas avaliadas (rosca cônica e a parafusada) apresentaram similaridade nos resultados em relação aos parâmetros de desempenho em questão: resistência à tração e deslizamento. Contudo, observou-se que o sistema de emenda mecânica com parafusos apresenta valores de deformação bastante inferiores aos do sistema de rosca cônica, fato atribuído à diferença do tipo de aço que ambas são fabricadas.

Apesar de não ter sido um parâmetro de avaliação neste trabalho, é de suma importância que o comprimento efetivo de ensaio da amostra emendada seja baseado no tipo de emenda a ser avaliado, ou seja, no caso de emendas com luvas deve-se considerar o comprimento da luva e o diâmetro da barra de aço. Portanto, propõe-se que procedimento

similar ao da ISO 15835 (2009) seja devidamente apreciado e posteriormente implementado na futura revisão da ABNT NBR 8548 (1984).

O procedimento de ensaio denominado neste trabalho como “Método 3”, com instrumentação baseada em HABER *et al.* (2015) e NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015) mostrou-se bastante eficiente para a obtenção dos parâmetros de interesse: resistência à tração e deslizamento. Com a inserção de quatro extensômetros elétricos, sendo dois nas barras de aço e outros dois nas luvas de emenda, além dos transdutores de deslocamento, em grupo de 3 e conectados a um aparato especial, foi possível monitorar minuciosa e detalhadamente deformações e deslizamentos nas amostras ao longo de todo o ensaio.

Adicionalmente, o uso de extensômetros elétricos em vários pontos da amostra foi de grande importância para registro das leituras de deformação e, conseqüentemente, de garantia de comportamento mecânico adequado, na pretendida avaliação de desempenho do sistema de emenda mecânico de barras de aço para concreto.

Quanto ao número de ciclos de carga, a constância nos resultados de deslizamento, ao final de cada um dos três ciclos, obtidas para o Método 3 de ensaio, pode indicar a suficiência de apenas 1 ciclo de carga para a obtenção do deslizamento final. Entretanto, esse fato deve ser melhor avaliado em trabalhos futuros, onde outros tipos de emendas mecânicas e outros diâmetros de barras emendadas devem ser ensaiados.

Considerando que o tipo de instalação dos transdutores, conectados individualmente à barra emendada, é o mesmo nos Métodos 1 e 2, pode-se concluir que esse tipo de conexão pode estar sujeito a eventuais movimentações dos transdutores ao final de cada ciclo de carga; o que, logicamente, poderia inviabilizar ambos os métodos de ensaio avaliados. Analisa-se, contudo, que apenas alguns dos ensaios que utilizaram o Método 2 como procedimento não atenderam ao limite máximo de 0,1 mm prescrito na ISO 15835 (2009) e DS-G-6647-029202 (2011).

Notou-se que, de maneira efetiva, a norma ABNT NBR 8548 (1984) está defasada e necessita de revisão quanto aos processos de ensaio e parâmetros de interesse a serem obtidos. Recomenda-se, portanto, considerar em seu escopo todos os métodos e tipos de emenda de barras de aço em estruturas de concreto armado disponíveis no cenário nacional, incluindo em uma futura revisão, o parâmetro deslizamento e seu respectivo método de ensaio.

Conclusivamente, esta pesquisa possui, portanto, a intenção de contribuir com o conhecimento das premissas e requisitos necessários para o desenvolvimento de novos estudos experimentais que envolvam as emendas mecânicas, além de oferecer subsídios para

discussão de procedimentos de avaliação de desempenho e instrumentação de luvas de aço nas futuras revisões da norma brasileira ABNT NBR 8548 (1984).

## **5.2.Recomendações para continuidade dos estudos**

A partir da realização desta dissertação, entende-se que podem ser desenvolvidos trabalhos futuros para continuidade dos estudos relacionados com os temas abaixo:

- Estudar outros tipos de emendas mecânicas disponíveis no mercado nacional em relação à sua resistência à tração e deslizamento, a fim de se comparar o desempenho com as luvas ensaiadas na presente pesquisa;
- Estabelecer uma maneira de controle da velocidade de aplicação de carga, a fim de verificar se este parâmetro pode influenciar nos resultados, uma vez que, nesta pesquisa, a velocidade dos ensaios não foi controlada devido às limitações da máquina universal e também de seu sistema operacional.
- Explorar a especificação do parâmetro de deslizamento no desenvolvimento de projetos de estruturas de concreto armado e verificar sua influência na redução das fissuras no concreto na região da emenda das barras, por meio de ensaios em escala real;
- Avaliar a resistência da emenda mecânica por luvas em estruturas de concreto armado em situações de incêndio;



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, M.S., YOUSSEF, M.A.; NEHDI, M.L. **Exploratory Investigation on Mechanical Anchors for Connecting SMA Bars to Steel or FRP bars**. Materials and Structures, Estados Unidos, v. 43, p.91-107, abr. 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete**. Nova Iorque, Estados Unidos, 2014. 524 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 439.3R-07: Types of mechanical splices for reinforcing bars**. Farmington Hills, Estados Unidos, 2007. 20 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A29: Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought**. Pensilvânia, Estados Unidos, 2015. 16 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1034A: Standard Test Methods for Testing Mechanical Splices for Steel Reinforcing Bar**. Pensilvânia, Estados Unidos, 2005. 6 p.

ANCON (Estados Unidos). **Rebar Splicing Systems**. Reino Unido, 2016. 12 p. Disponível em: < <https://www.ancon.co.uk/downloads/technical-literature>>. Acesso em: 08 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11561: Qualificação, execução e controle em emendas mecânicas de topo com luvas, destinadas a armações de concreto para centrais nucleoeletricas**. Rio de Janeiro, 1990. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, 2007. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8548: Barras de aço destinadas a armaduras de concreto armado com emenda mecânica ou por solda – Determinação da resistência à tração**. Rio de Janeiro, 1984. 5 p.

BALLARIN, A. W. **Desempenho das ligações de elementos estruturais pré-moldados de concreto**. 1993. 262 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

BAR SPLICE PRODUCT INC. (Estados Unidos). **General brochure splice systems**. Dayton, 2010. 15 p.

BECK, A.; OLIVEIRA, W. L. A. de; DEBS, A. L. H. C. El. **Reliability-based evaluation of design code provisions for circular concrete-filled steel columns**. Engineering Structures, Estados Unidos, v. 31, n. 10, p.2299-2308, out. 2009.

BEEBY, A. **Cracking Cover at Corrosion of Reinforcement**. Concrete International: Design And Construction, Estados Unidos, v. 5, n. 2, p.35-40, fev. 1983.

BJORDHODVE, R. **Classification system for beam-two column connections**. J. Struct. Div. v. 116 in. ST11, p. 3059-3076, 1990.

CAGLEY, J. R.; APPLE, R. **Comparing Costs- Butt Splice Versus Lap Splice**. Concrete International, Estados Unidos, v. 20, n. 7, p.55-56, jul. 1998.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, DIVISION OF ENGINEERING SERVICES. **CT670: Method of tests for mechanical and welded reinforcing steel splices**. Sacramento, Estados Unidos, 2011. 11 p.

CATOIA, B. **Comportamento de vigas protendidas pré-moldadas com ligações semi-rígidas**. 2007. 215 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CHEN, G.; BAKER, G. **Energy approach to numerical modeling of crack spacing in reinforced concrete**. Recent Advances in Computational Science and Engineering, [S. I], p.569-572, dez. 2002.

CHEOK, G.S.; LEW, H.S. **Performance of precast concrete beam-t-column connections subject to cyclic loading**. PCI Journal. Estados Unidos, p. 56-57. maio 1991.

CHIARI, V. G.. **Avaliação da metodologia experimental e parâmetros de desempenho de luvas de aço para emendas mecânicas em estruturas de concreto**. In: 59º IBRACON -

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONGRESSO, 2017, Bento Gonçalves, RS. Bento Gonçalves.

CHIARI, V. G.; CALÇAVARA JUNIOR, E.; COLARUSSO, L. J.. **Estudo de caso envolvendo a aplicação de luvas para emenda mecânica de elementos pré-moldados de concreto**. In: 58 IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DO CONGRESSO, 2016, Belo Horizonte, MG.

CHIARI, V. G.; GONÇALVES, A. J. M.. **Case study involving the use of mechanical couplers for construction of the precast elements on Olympic Tennis Centre for Rio 2016 in Brazil**. In: 6º STRUCTURAL ENGINEERING WORLD CONGRESS (SEWC), 2017, Cancun, México.

CHIARI, V. G.; MORENO JUNIOR, A. L.. **Comportamento de luvas para emendas mecânicas de barras de aço em estruturas de concreto armado**. In: 37º JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 2016, Assunção, Paraguai.

CHIARI, V. G.; MORENO JUNIOR, A. L.. **Utilização de luvas para emenda mecânica de barras de aço para reforço de estruturas de concreto armado**. In: 7º CINPAR - CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2016, Porto, Portugal.

CHOWDHURY, S. H.; LOO, Y. C. **A new formula for prediction of crack widths in reinforced and partially prestressed concrete beams**. Advances in Structural Engineering,[S.I], v. 4, n. 2, p.101-110, abr. 2001.

DAVIS, J.R. **Tensile Testing**. 2. ed. Materials Park, Estados Unidos: ASTM International, 2004. 283 p.

ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR. **DS-G-6647-029202: Especificação para Armaduras**. Rio de Janeiro, 2011. 31 p.

ELETRONUCLEAR, Eletrobrás. **Angra 1 completa 30 anos olhando para o futuro**. 2012. Disponível em:  
<<http://www.eletronuclear.gov.br/Noticias/NoticiaDetalhes/tabid/191/NoticiaID/596/Default.aspx>>. Acesso em: 07 mar. 2016.

ELETRONUCLEAR, Eletrobrás. **Angra 2**. 2010. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear/Angra2.aspx>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

EUROCODE. **NF-EN-1992: Eurocode 2: Calcul des structures en béton**. França, 2007. 203 p.

FERREIRA, M. A. **Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. 1999. 253 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

FERREIRA, M. A.. **Estudo de deformabilidades de ligações para análise linear em pórticos planos de elementos pré-moldados de concreto**. 1993. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

FERREIRA, M.A.; EL DEBS, M. K.; ELLIOTT, K. S. **Modelo teórico para projeto de ligações semi-rígidas em estruturas de concreto pré-moldado**. In: 44º IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DO CONGRESSO, 2002, Belo Horizonte, MG.

FUSCO, P. B.. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2. ed. Sao Paulo: Pini, 1995. 382 p.

HABER, Z.B.; SAIIDI, M.S.; SANDERS, D.H.. **Behavior and simplified modeling of mechanical reinforcing bar splices**. PCI Structural Journal, Estados Unidos, v. 16, n. 112, p.179-189, abr. 2015.

HABER, Z.B.; SAIIDI, M.S.; SANDERS, D.H.. **Emulative column footing connections for seismic designs in a accelerate bridge construction**. In: 4º ECCOMAS THEMATIC CONFERENCE ON COMPUTATIONAL METHODS IN STRUCTURAL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING, 2013, Kos Island, Grécia. Artigos. Estados Unidos: Universidade de Reno, 2013.

HALVORSEN, G. T. **Code Requirements for Crack Control**. ACI - Concrete And Concrete Construction, Farmington Hills, Estados Unidos, v. 104, p.275-322, out. 1987.

HUACO, G.; JIRSA, J. **Performance of Damaged Column Retrofitted with Innovative Materials and Devices**. In: 15<sup>o</sup> WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 2012, Lisboa, Portugal: International Association for Earthquake Engineering, 2012. p. 1 - 10.

HULSHIZER, A. J.; UCCIFERRO, J. J.; GRAY, G. E. **Mechanical Reinforcement Meet Demands of Strength and Constructability**. Concrete International, Estados Unidos, v. 16, n. 12, p.47-52, dez. 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARIZATION. **ISO 15630-1: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire**. Genebra, Suíça, 2010. 37 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARIZATION. **ISO 15835-1: Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars — Part 1: Requirements**. Genebra, Suíça, 2009. 20 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARIZATION. **ISO 15835-2: Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars — Part 2: Test methods**. Genebra, Suíça, 2009. 16 p.

ITAIPU. **Itaipu - A maior geradora de energia limpa e renovável do planeta**. 2015. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 06 mar. 2016.

JEREMIAS JUNIOR, A. C. **Análise da estabilidade de estruturas pré-moldadas de concreto: influência das ligações semi-rígidas**. 2007. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

JOKUBAITIS, V.; JUKNEVICIUS, L. **Influence of reinforcement couplers on the cracking of reinforced concrete members**. In: 10<sup>o</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE OF CONCRETE, 2010, Vilnius, Lituânia. Artigo. Vilnius: Universidade Técnica Vilnius Gediminas, 2010. p. 646 - 650.

KLIMENOV, V.; OVCHINNIKOV, A.; USTINOV, A. **Stress-Strain State of Mechanical Rebar Couplings**. Journal of Physics: Conference Series, [S.I], v. 1691, n. 1, p.1-4, 2016.

LENTON (Estados Unidos). **Manual de instrução rosqueadeira de barras de aço**. LENTON. Cleveland, 2011. 20 p. Título Original: Standard Bar Threader Instruction Manual.

LENTON (Estados Unidos). **Taper Threaded Rebar Splicing Systems**. Cleveland, 2011. 15 p. Disponível em: <<https://www.erico.com/catalog/literature/CP7J-WWEN.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2017.

LLOYD, W.R.. **Qualification of the Bar-Lock Rebar Coupler for Use in Nuclear Safety-Related Applications Mechanical Testing Program and Performance Analysis**. Idaho, Estados Unidos: Idaho National Engineering, 2001. 22 p. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Materials Department.

NGUYEN, D. P.; MUTSUYOSHI, H.. **Influence of Quality of Mechanical Splices on Behavior of Reinforced Concrete Members**. Research Report Of Department Of Civil And Environmental Engineering, Saitama, Japão, v. 41, p.32-43, 2015.

NMB. **Catálogo geral dos sistemas Splice Sleeve**. Linonia, Estados Unidos, 2016. 12 p. Título original: General brochure of Splice Sleeve Systems.

NOUREDDINE, I.. **Plastic Energy Absorption Capacity of #18 Reinforcing Bar Splices under Monotonic Loading**. 1996. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, California State University, Sacramento, 1996.

ORDOÑEZ, J.A.F. **Prefabrication teoría y práctica**. 2. ed. Barcelona, Espanha: Editores Técnicos Asociados, S. G., 1974. 635 p.

ORI. **Parque da Cidade**. 2017. Disponível em: <<https://www.orealizacoes.com.br/comerciais/parque-da-cidade-office>>. Acesso em: 03 dez. 2017.

PAULSON, C.; HANSON, J. M.. **A Summary and Review of Fatigue Data for Mechanical and Welded Splices in Reinforcing Bars**: Structural Materials: Proceedings of the Sessions related to Structural Materials at Structures Congress '89. 5. ed. São Francisco, Califórnia, Estados Unidos: Structural Materials, 1989. 592 p.

RUDLOFF (Brasil). **Catálogo técnico - Emendas para barras de aço**. São Paulo, 2011. 17 p.

SAIIDI, M.S.; WANG, H. **Exploratory Study of Seismic Response of Concrete Columns with Shape Memory Alloys Reinforcement**. ACI Structural Journal. Estados Unidos, p. 436-443. maio 2006.

SEO, S.Y.; NAM, B.R.; KIM, S.G.. **Tensile strength of the grout-filled head-splice-sleeve**. Construction And Building Materials, Estados Unidos, v. 124, p.155-166, out. 2016.

SILVA, K. C. da. **Estudo experimental de uma emenda de barra para concreto armado com tubo de aço e graute**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

SINGH, R.; HIMANSHU, S. K.; BHALLA, N.. **Reinforcement couplers as an alternative to lap splices: A case study**. International Journal of Engineering Research & Technology, Gujarat, India, v. 2, n. 2, p.1-6, fev. 2013.

SOUZA, A.S.. **Comportamento de elementos pré-moldados de concreto com ligações semi-rígidas**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SOUZA, Roberto de. **Inovação na cadeia produtiva da construção**. 2015. Disponível em: <<http://www.enredes.com.br/eventos/encontro-de-diretores-e-gestores-da-construcao/>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

SPOFFORD, C. M. **Thaddeus Hyatt, an early American investigator and user of reinforced concrete**. 1913. Disponível em: <[https://glassian.org/Prism/Hyatt/thaddeus\\_hyatt\\_bio\\_spofford\\_1913.html](https://glassian.org/Prism/Hyatt/thaddeus_hyatt_bio_spofford_1913.html)>. Acesso em: 02 dez. 2017.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER. **REPORT NO. ERDC TR-09-8: High Strain-Rate Testing of Mechanical Couplers**. Washington, Estados Unidos: Us Army Corps Of Engineers, 2009. 74 p.

YANG, Y.; SNEED, L.H.; MORGAN, A. **Repair of Earthquake-Damaged Bridge Columns with Interlocking Spirals and Fractured Bars: Report No. CA 14-2179**. Califórnia, Estados Unidos: California Department Of Transportation, 2014. 211 p.

## APÊNDICE A – ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

A finalidade de se realizar ensaios exploratórios foi de observar não só os resultados da resistência ao escoamento,  $f_y$ , o limite de resistência,  $f_{st}$ , e deslizamento das barras emendadas, mas, principalmente, atestar a eficácia da instrumentação utilizada para cada ensaio e a metodologia sugerida, para que fossem aplicados nos ensaios principais. Todos os ensaios exploratórios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da UNICAMP.

### Metodologia experimental

Foram realizados quatro ensaios exploratórios nas barras com emenda por luvas de rosca cônica, sendo três de 20 mm e um de 25 mm de diâmetro. Todos eles foram baseados na metodologia sugerida pela norma internacional ISO 15835 (2009), considerando a aplicação de três ciclos de carga para a determinação do deslizamento.

O comprimento total das amostras foi de 700 mm e a dimensão útil ( $L_g$ ) das barras emendadas por luvas foram 232 mm para as barras de 20 mm e 286 mm para as de 25 mm. A nomenclatura utilizada indica que “EE” corresponde ao ensaio exploratório, “RC” à luva de rosca cônica, o número seguinte ao diâmetro da barra (20 ou 25 mm) e o último caractere ao número da amostra ensaiada.



Apesar de utilizar a mesma metodologia de ensaio para todas as amostras, a instrumentação experimentada foi distinta. Nos ensaios EE-RC-20mm-1 e EE-RC-20mm-2 optou-se por utilizar apenas dois transdutores de deslocamento (Figura A-1), com o objetivo de medir o deslizamento da barra em relação à emenda ao final do terceiro ciclo de carga. O EE-RC-20mm-1 foi procedido simplesmente para analisar o deslizamento total, sem avaliar, portanto, a resistência à tração das barras emendadas ou o comportamento da curva força *versus* deformação ao longo do ensaio. Posteriormente, o ensaio EE-RC-20mm-2 utilizou a



mesma instrumentação. No entanto, foram avaliados todos os parâmetros de interesse desta pesquisa.

Para os ensaios EE-RC-20mm-3 e EE-RC-25mm-1, adicionaram-se quatro transdutores instalados próximos às garras superior e inferior da máquina universal de tração com a função de medir o deslocamento relativo da barra em relação a essas garras. Para que fosse possível alinhar todos os instrumentos de medição e obter suas leituras com precisão, utilizaram-se duas canaletas de alumínio perfuradas (Figura A-2).

Nesses ensaios, adicionam-se ainda quatro extensômetros elétricos, sendo dois nas barras de aço (Figura A-3) a uma distância de  $4d$  da face da luva de emenda, como sugerido por HABER *et al.* (2015), e outros dois, instalados paralelamente, em lados opostos, no centro da luva (Figura A-4), com a finalidade de medir a deformação em todos os pontos passíveis de ruptura. As leituras foram obtidas por meio do aquisitor de dados e registrados pelo software utilizado. Todos os extensômetros elétricos foram ligados ao aquisitor de dados por um cabo auxiliar condutor.



Figura A-1. Transdutores instalados na amostra EE-RC-20mm-1.  
Fonte: Autor



Figura A-2. Transdutores e extensômetros elétricos instalados no EE-RC-20mm-3 com o auxílio de uma canaleta de alumínio.  
Fonte: Autor



Figura A-3. Extensômetro elétrico colado na nervura da barra de aço.  
Fonte: Autor

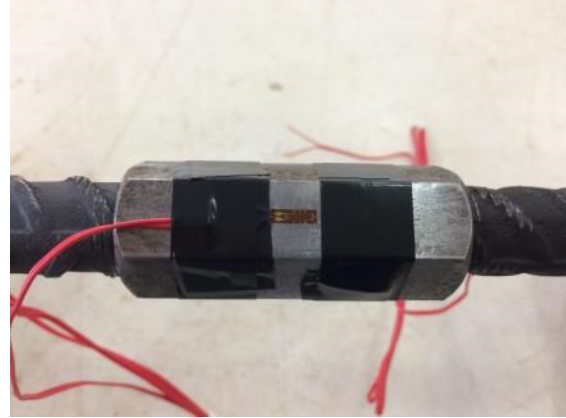


Figura A-4. Extensômetro elétrico instalado no centro da luva de rosca cônica.  
Fonte: Autor

### Resultados experimentais

A Tabela A-1 mostra os resultados obtidos para os ensaios exploratórios. A Figura A-5 mostra o detalhe da rosca após ser “arrancada” e a Figura A-6 ilustra o “alongamento” da rosca de um dos ensaios.

Tabela A-1. Resultados dos ensaios exploratórios das luvas de rosca cônica

Amostra	$f_y$ (MPa)	$f_{st}$ (MPa)	Deslizamento (mm)
EE-RC-20mm-1	Sem resultado	Sem resultado	0,10
EE-RC-20mm-2	534	631	0,09
EE-RC-20mm-3	519	627	0,09
EE-RC-25mm-1	560	687	0,09

### Análise dos métodos e resultados

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios exploratórios foi possível analisar a metodologia de ensaio e as instrumentações utilizadas. É importante ressaltar que os valores obtidos nos ensaios para resistência ao escoamento,  $f_y$ , e o limite de resistência,  $f_{st}$ , cumpriram os requisitos da norma ABNT NBR 7480 (2007). O mesmo aconteceu com o parâmetro de deslizamento, cujos resultados estiveram de acordo com o limite máximo estabelecido pela normativa DS-G-6647-029202 (2011). Contudo, os valores obtidos nos ensaios foram coadjuvantes, uma vez que o objetivo principal nesta fase era analisar a eficácia da metodologia e instrumentação utilizadas, a fim de serem aplicadas aos ensaios principais.

A metodologia de dimensionamento do comprimento útil das amostras ( $L_g$ ) proposta na norma internacional ISO 15835 (2009) foi considerada adequada devida sua

compacidade, mesmo quando aplicada em luvas de grandes dimensões, como as parafusadas. Não obstante, a dimensão total da amostra deve ser analisada em cada caso a depender da máquina universal de tração utilizada nos ensaios.

No EE-RC-20mm1 e EE-RC-20mm-2 foram usados somente dois transdutores conectados à barra de aço com o auxílio de grampos tipo “C” para a medição do parâmetro de deslizamento. Verificou-se que tal parâmetro pôde ser medido em ambos os ensaios, apesar de estar sempre passível de pequenas movimentações devido à maneira como foram conectados à barra de aço ou à luva. Em caso de estar fixo junto à barra de aço, por exemplo, deve-se sempre observar o posicionamento da nervura para evitar qualquer movimentação dos transdutores.

Do mesmo modo, no ensaio EE-RC-20mm-3 e EE-RC-25mm-1 foram inseridos extensômetros elétricos em quatro pontos distintos do amostra, além de quatro transdutores para medição do deslocamento relativo junto às garras. Observou-se que as leituras dos extensômetros elétricos foram bastante valiosas para analisar a qualidade e a resistência das barras de aço e luva (Figura A-5). No âmbito das características das barras de aço, a resistência ao escoamento,  $f_y$  foi bastante similar aos obtidos nos ensaios das barras de controle, exceção feita somente no EE-RC-25mm-1.

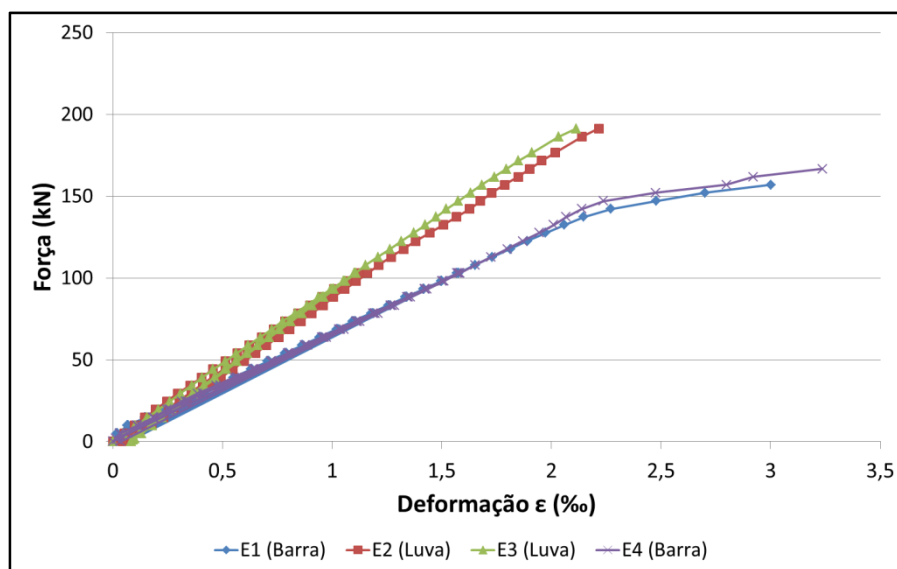


Figura A-5. Curva força *versus* deslizamento do ensaio EE-RC-20mm-2.  
Fonte: Autor

A Figura A-6 mostra a curva tensão *versus* deslizamento, cujos resultados mostram a eficácia das leituras dos transdutores quando posicionados junto à barra de aço e à emenda mecânica. Em contrapartida, a Figura A-7 também ilustra a curva tensão *versus*

deslizamento, porém, dos transdutores posicionados na canaleta de alumínio. Tal figura mostra a ineficiência da utilização destes transdutores, indicando que eles em nada contribuíram para a determinação do deslizamento devido sua movimentação ao longo do ensaio.

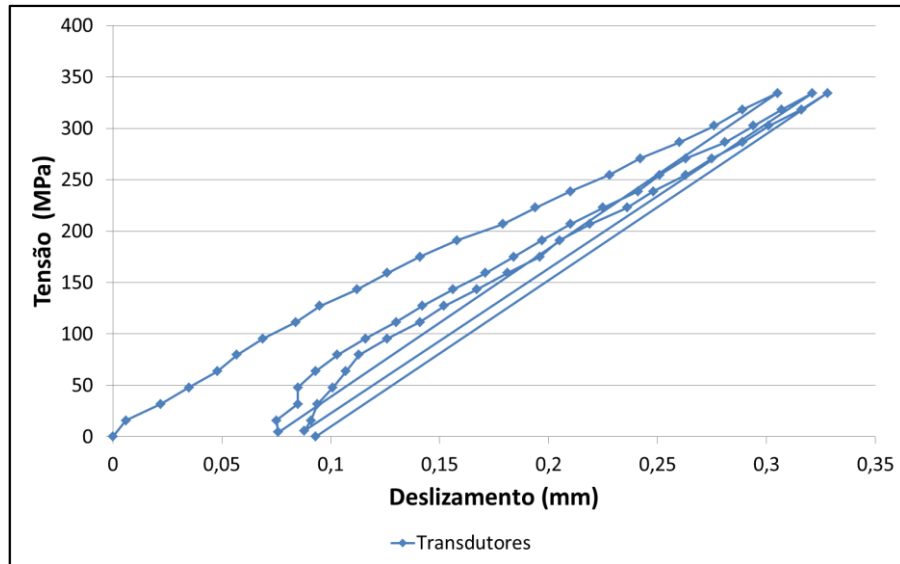


Figura A-6. Curva tensão *versus* deslizamento dos transdutores posicionados na barra de aço e na emenda mecânica.

Fonte: Autor

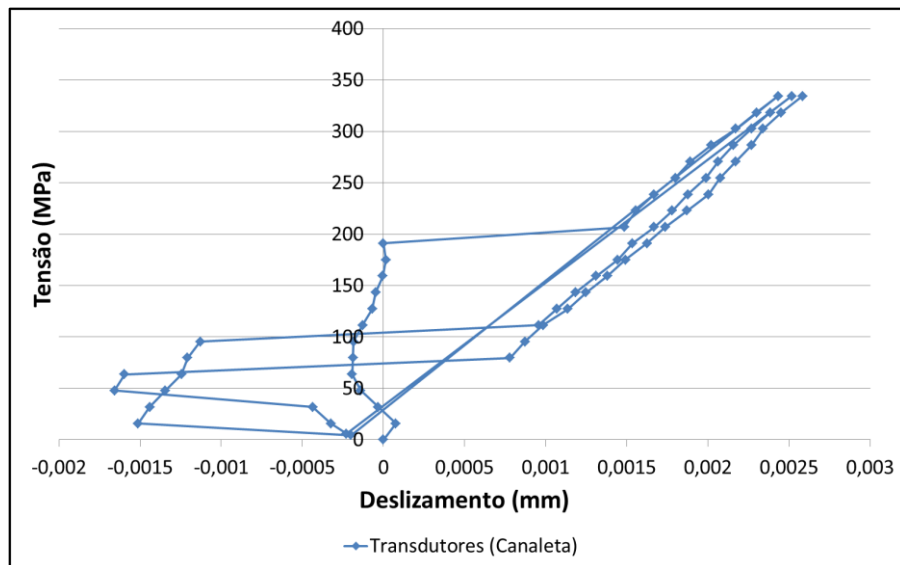


Figura A-7. Curva tensão *versus* deslizamento dos transdutores posicionados na canaleta de alumínio.

Fonte: Autor

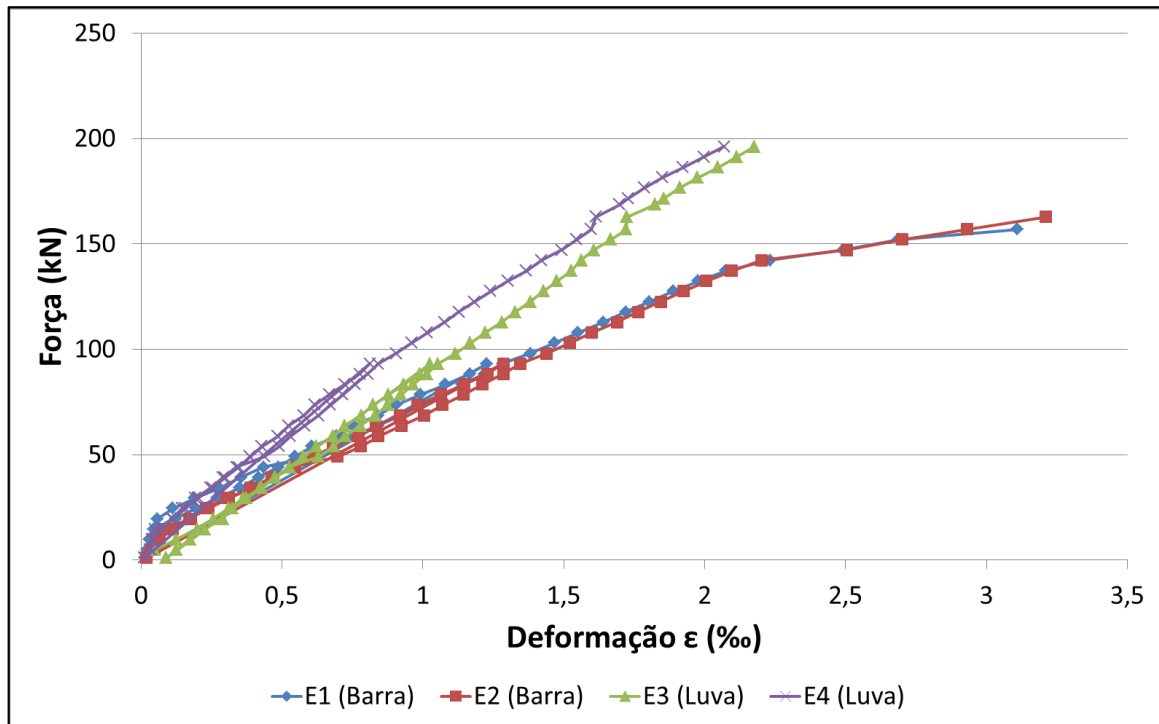
**Recomendações aos ensaios principais**

- Realizar ensaios por meio de métodos distintos de avaliação, a fim de comparar o escopo da ABNT NBR 8548 (1984) e ISO 15835 (2009);
- Adotar a instrumentação de acordo com o proposto por HABER *et al.* (2015) e NGUYEN & MUTUSUYOSHI (2015) devido à similaridade dos ensaios e parâmetros de interesse;
- Inserir os extensômetros elétricos a uma distância de  $2d$  das faces da emenda mecânica, a fim de adequar o dimensionamento das amostras ao proposto no escopo da ISO 15835 (2009);
- Retirar a canaleta de alumínio, uma vez que os transdutores estavam passíveis de movimentação, devido sua dificuldade de fixação à amostra;
- Não inserir transdutores para medir o deslocamento relativo da barra em relação à garra do equipamento universal de tração, pois o valor medido não influencia significativamente na determinação do deslizamento da barra de aço em relação à emenda mecânica.

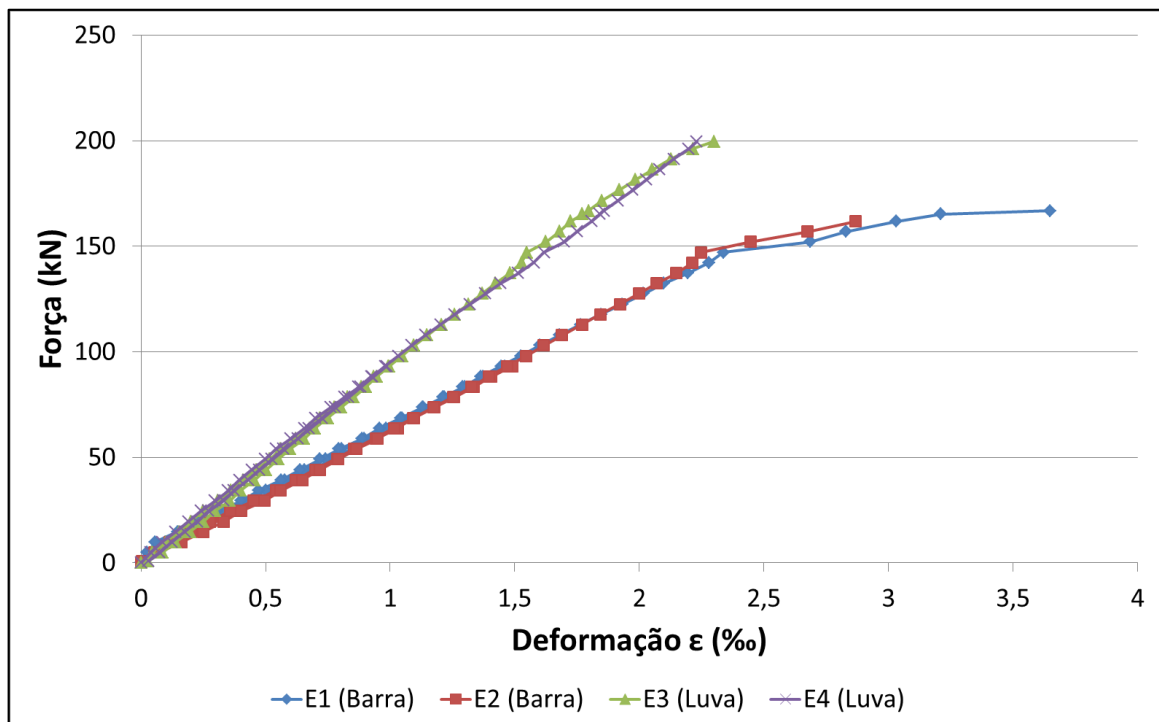
**APÊNDICE B - CURVAS FORÇA *VERSUS* DEFORMAÇÃO**

## Luva de Rosca Cônica 20 mm

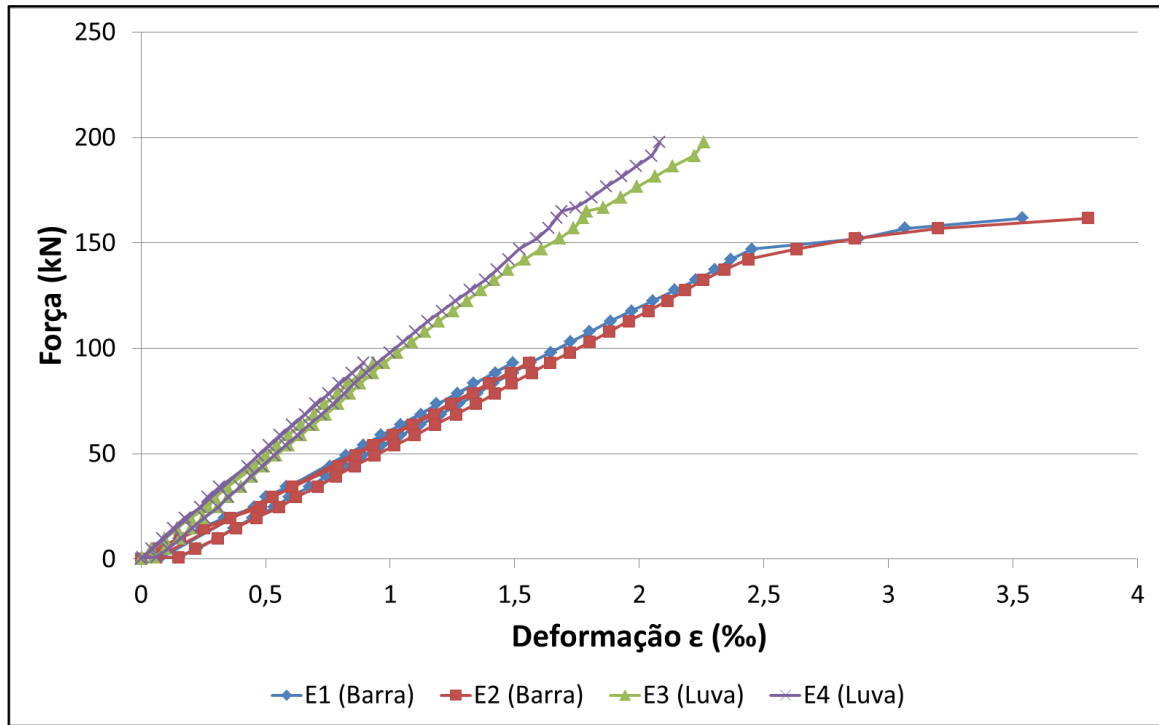
### RC-20mm-1 – Método 1



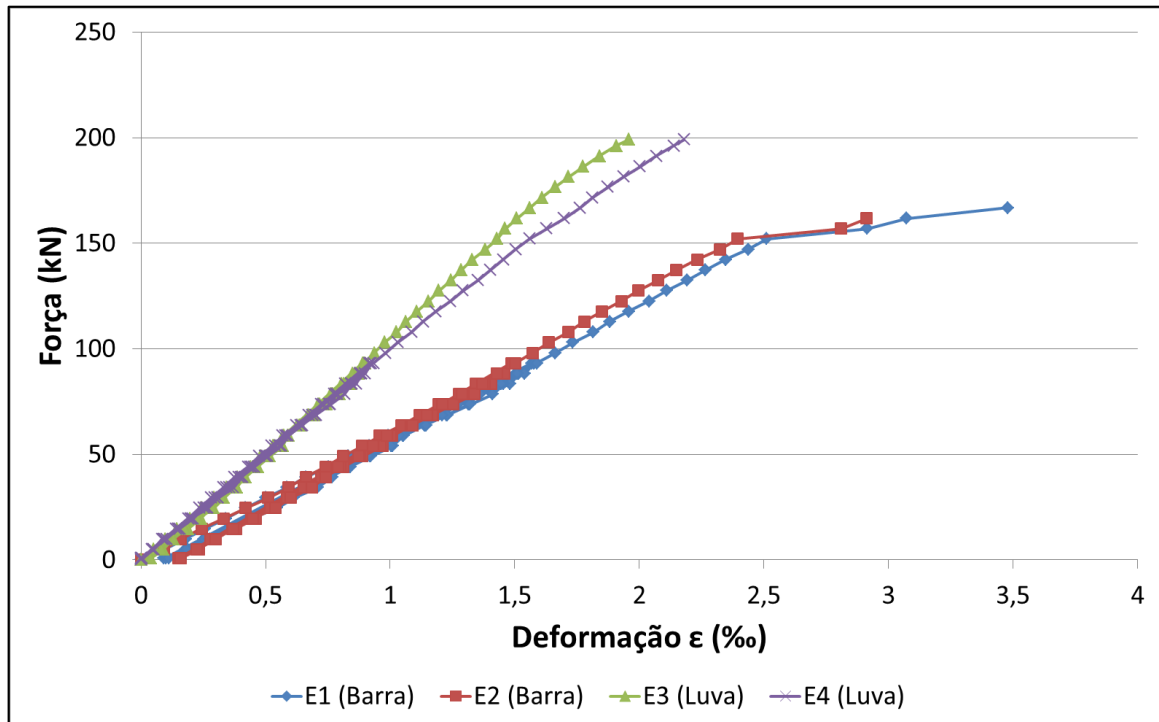
### RC-20mm-2 – Método 1



### RC-20mm-3 – Método 1

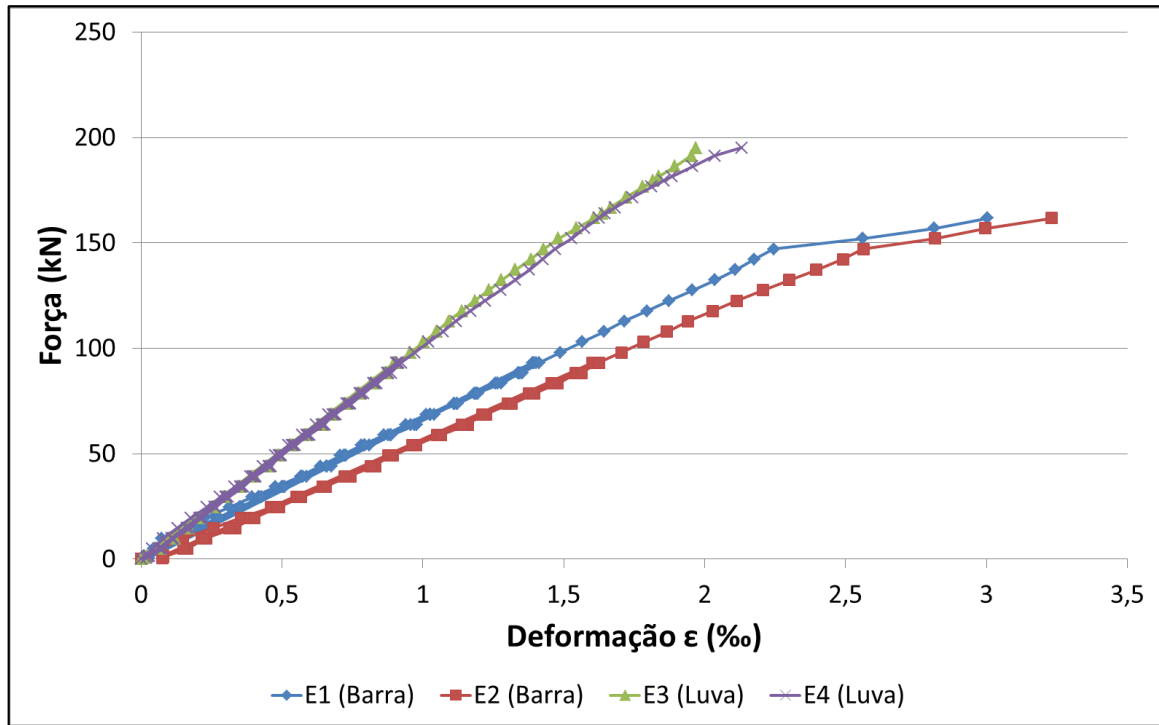


### RC-20mm-4 – Método 2

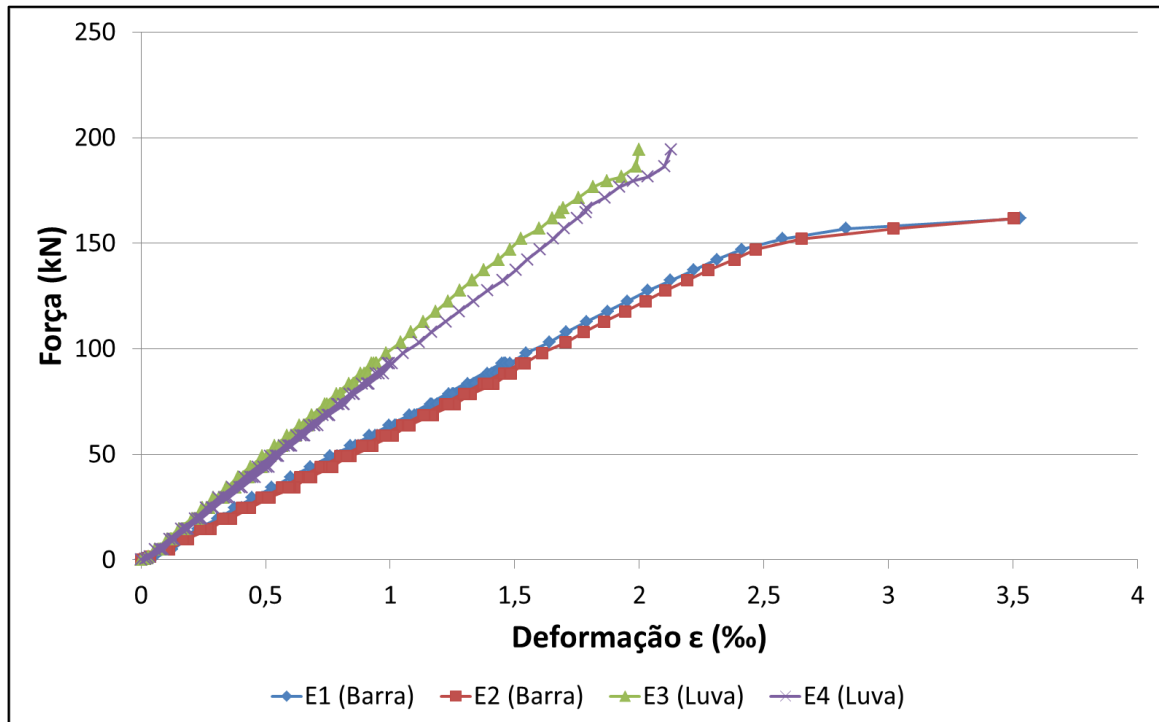




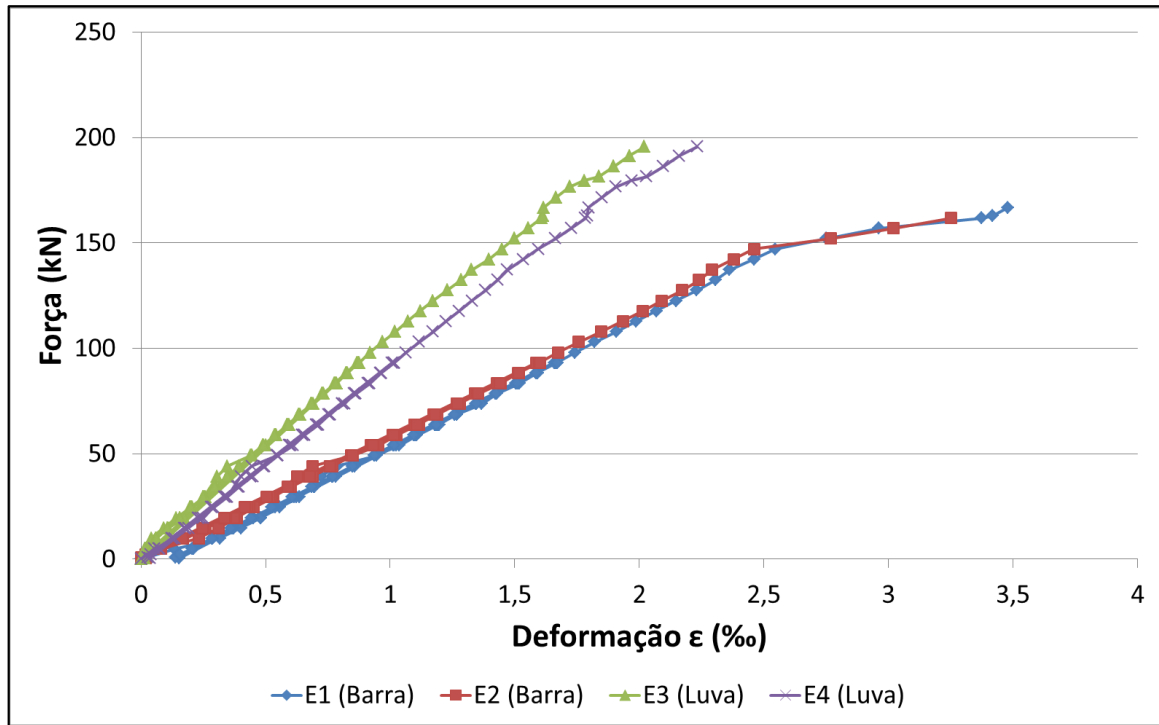
### RC-20mm-5 – Método 2



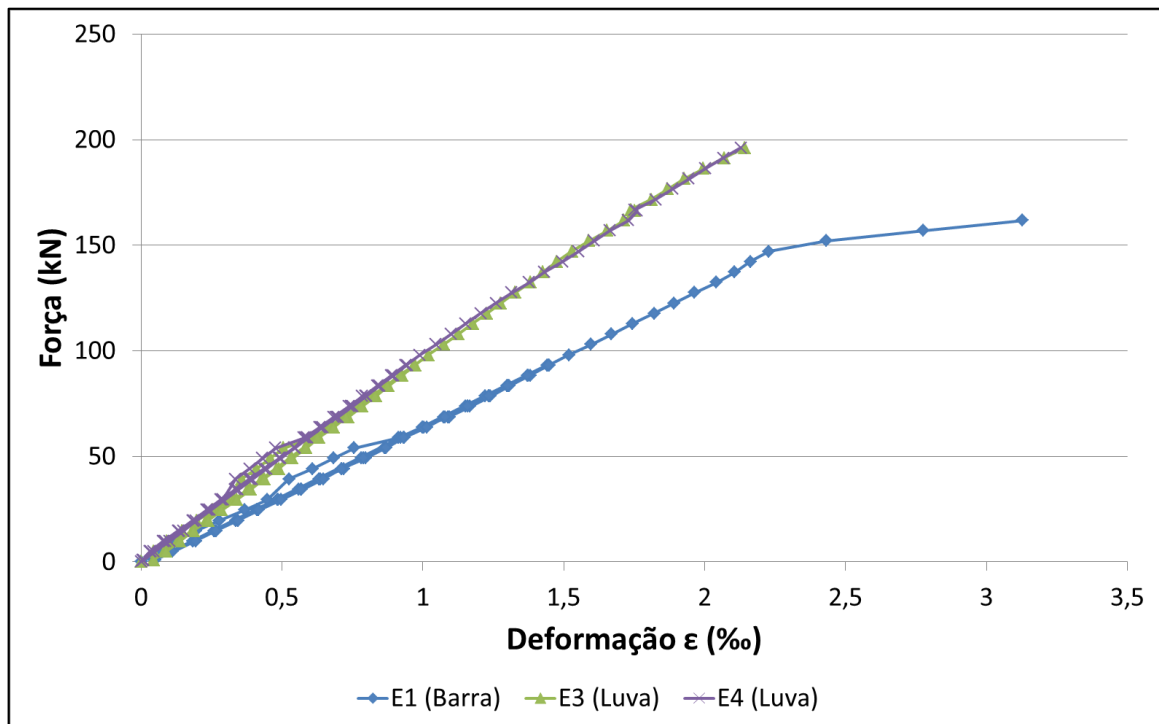
### RC-20mm-6 – Método 2

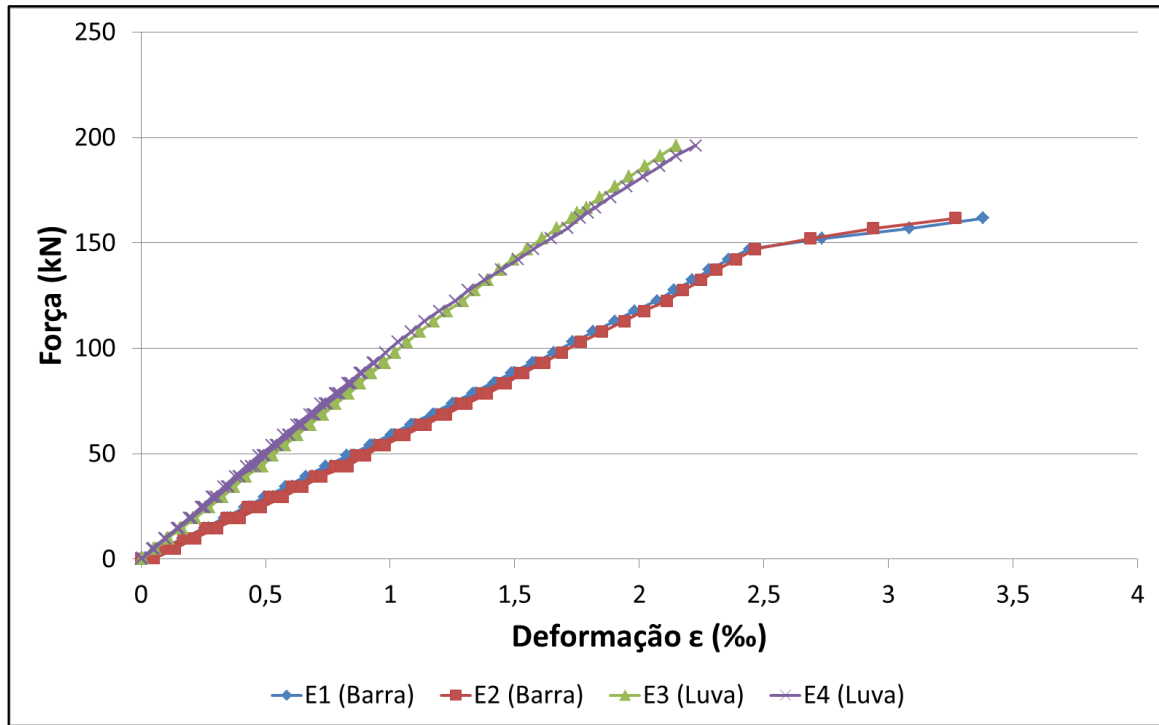


### RC-20mm-7 – Método 3



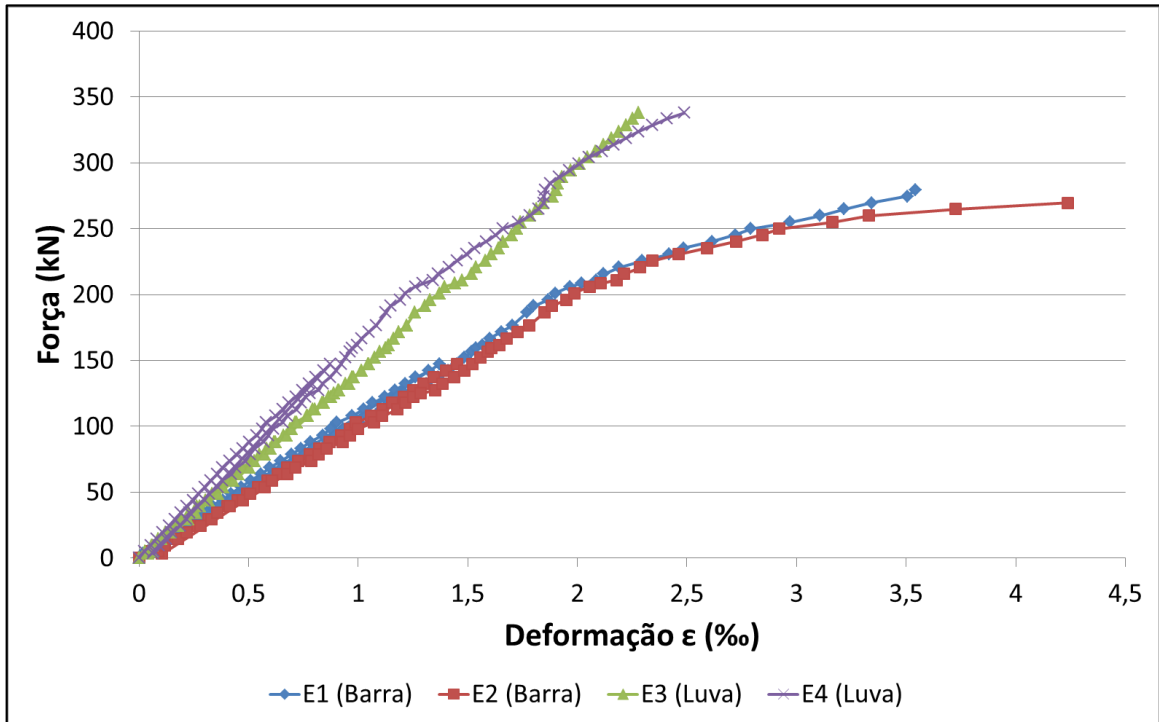
### RC-20mm-8 – Método 3



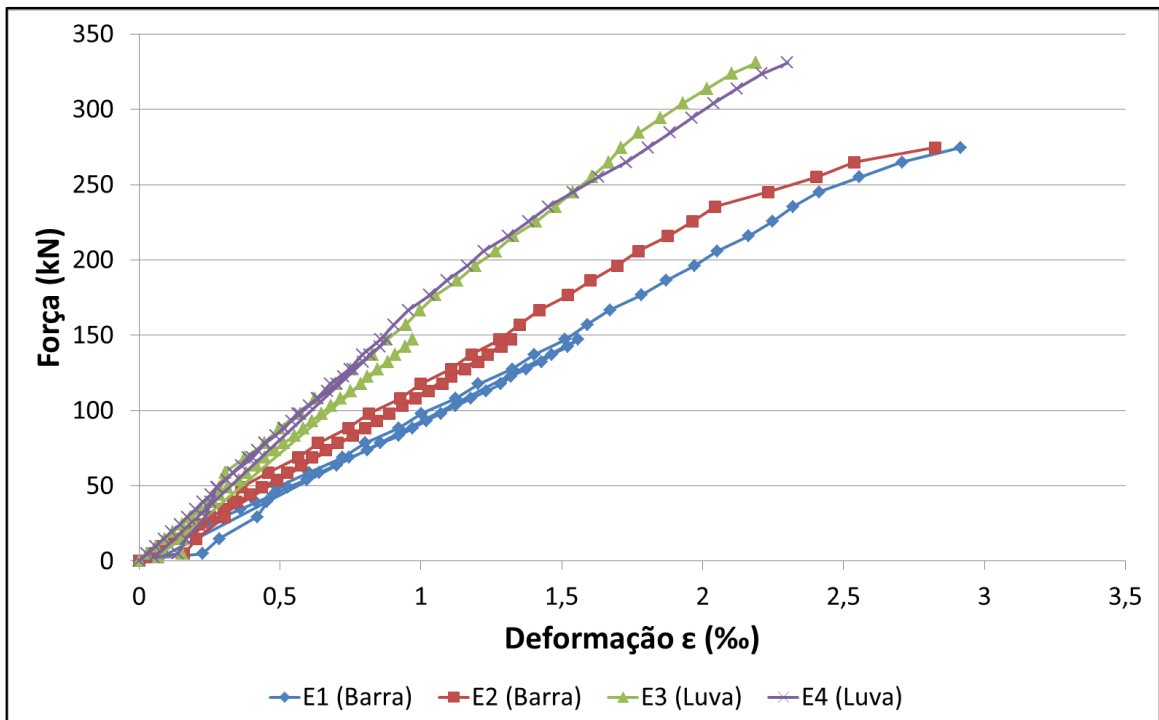
**RC-20mm-9 – Método 3**

## Luva de Rosca Cônica 25 mm

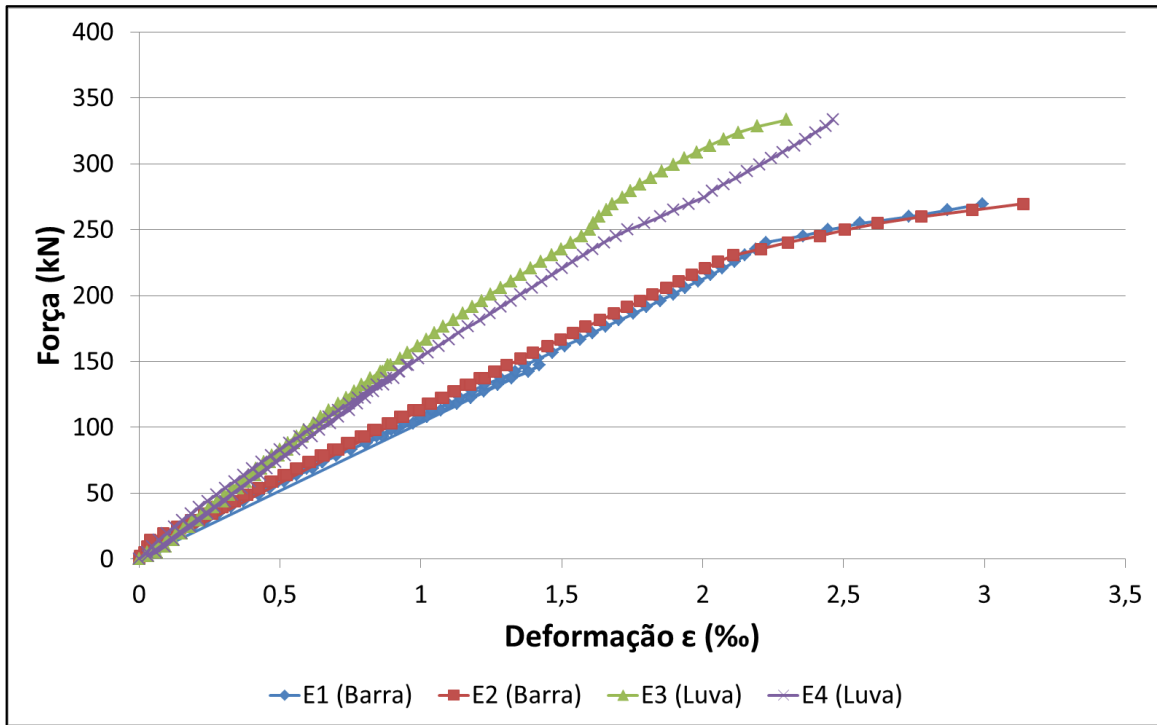
### RC-25mm-1 – Método 1



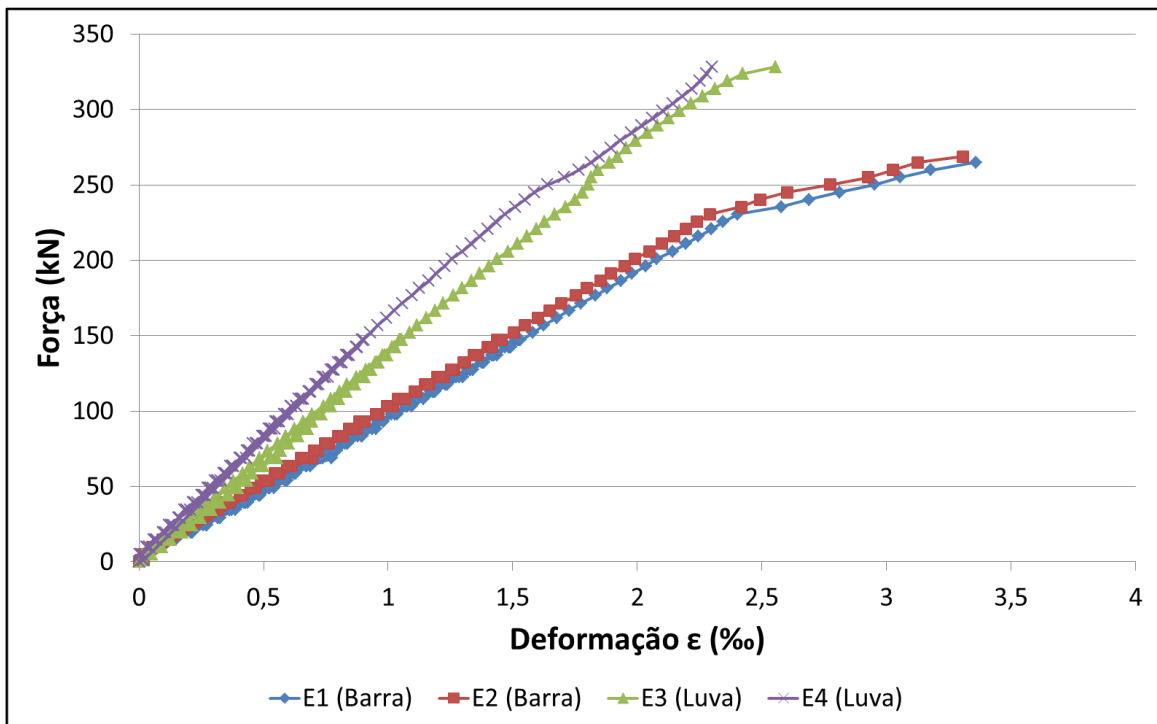
### RC-25mm-2 – Método 1

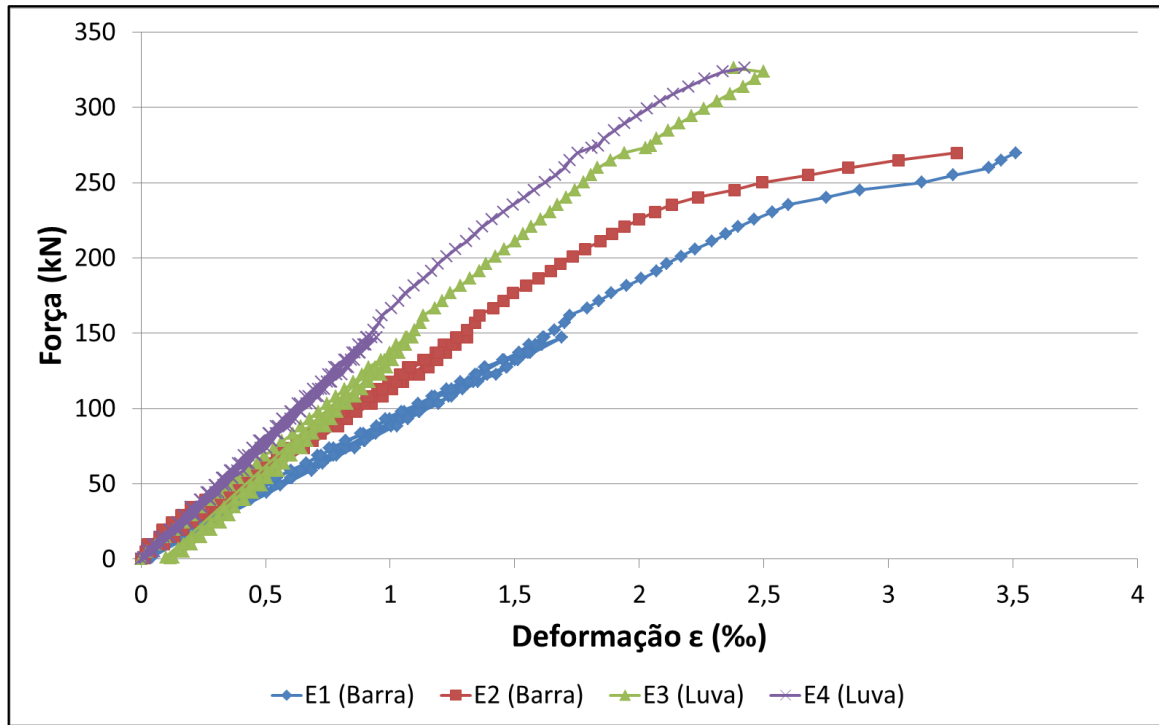
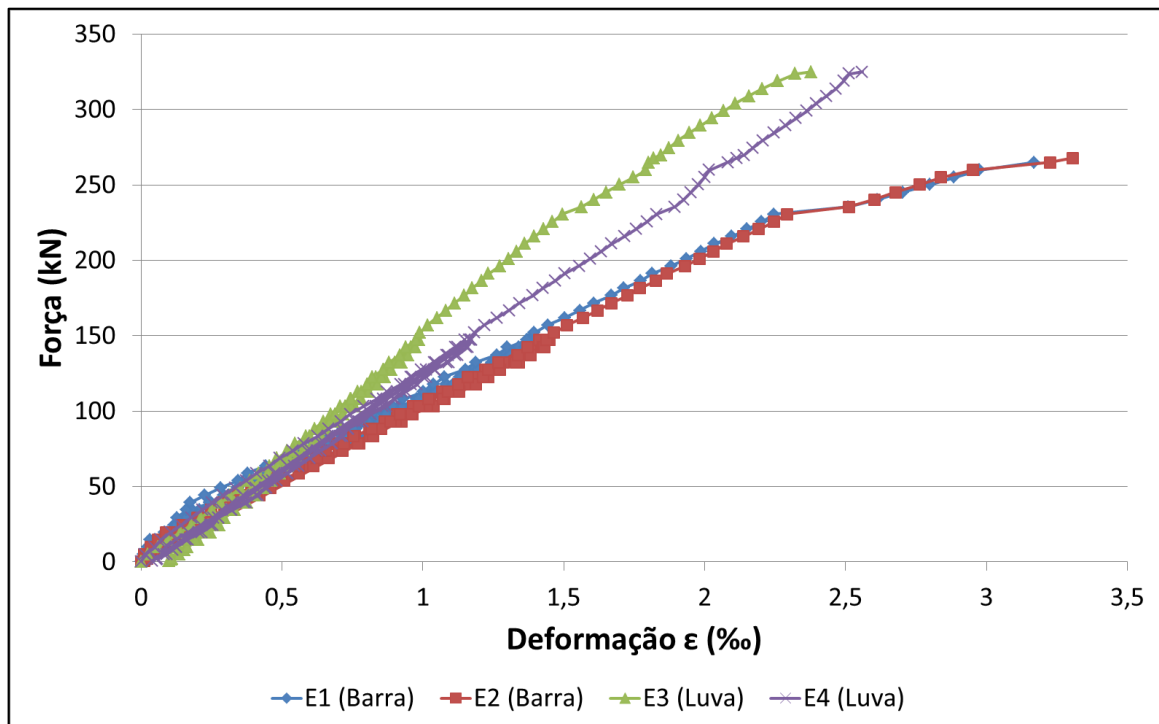


### RC-25mm-3 – Método 1

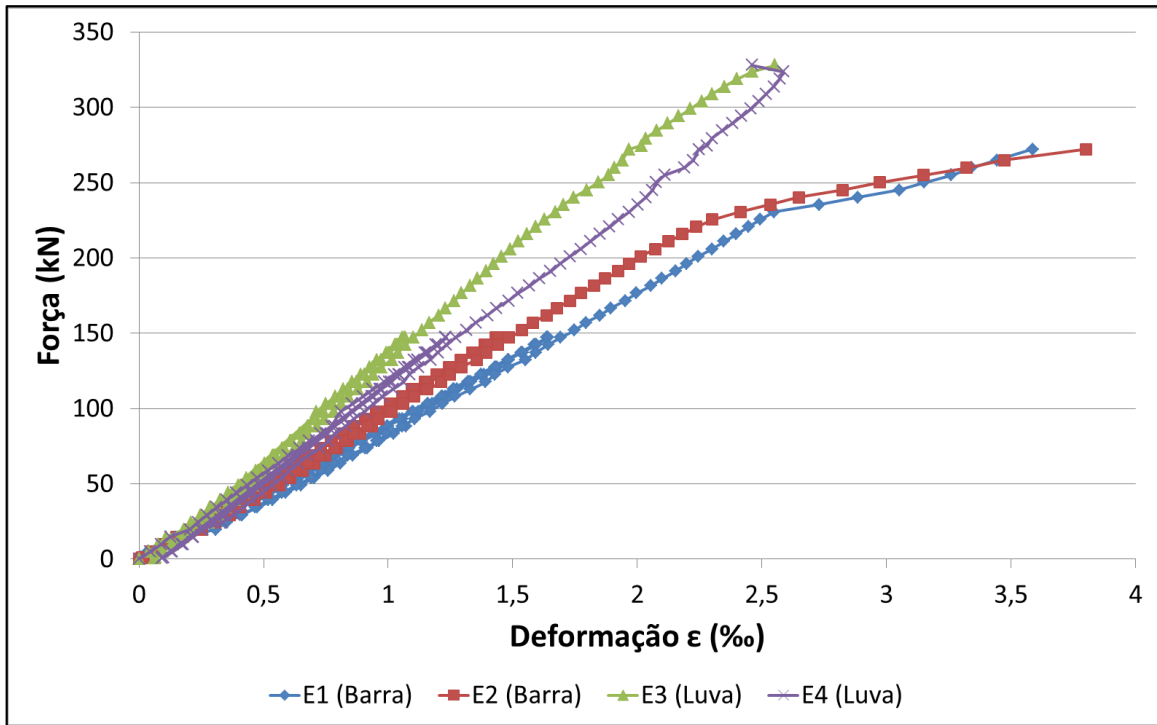


### RC-25mm-4 – Método 2

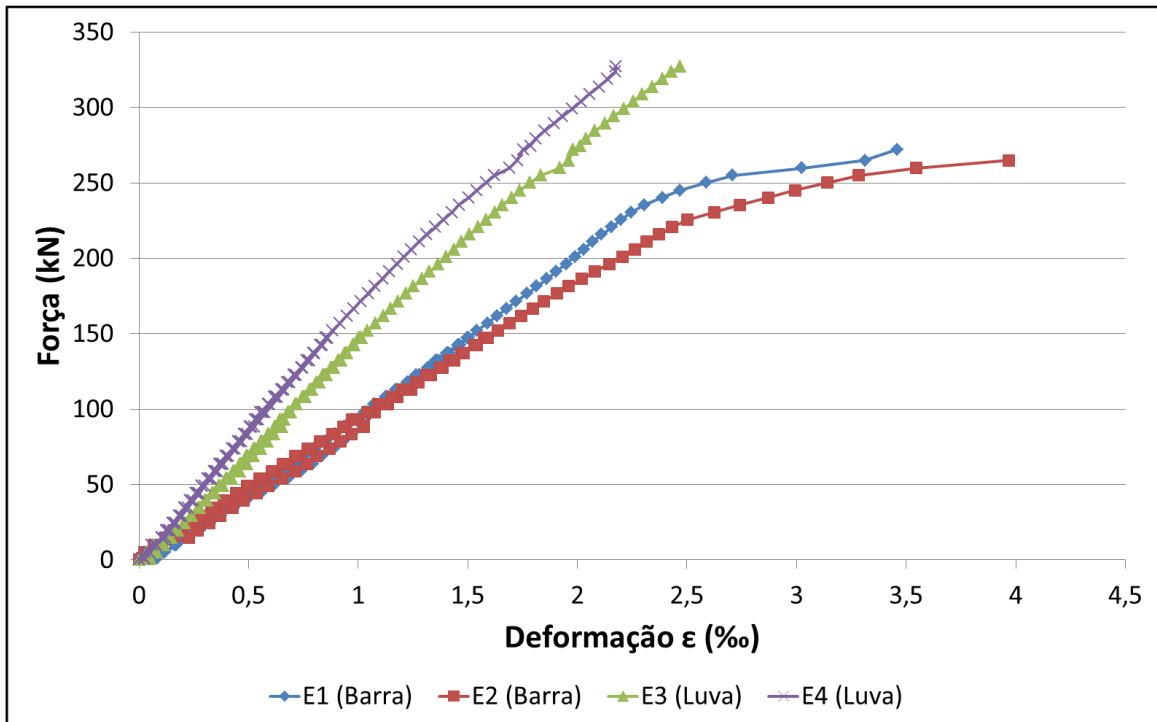


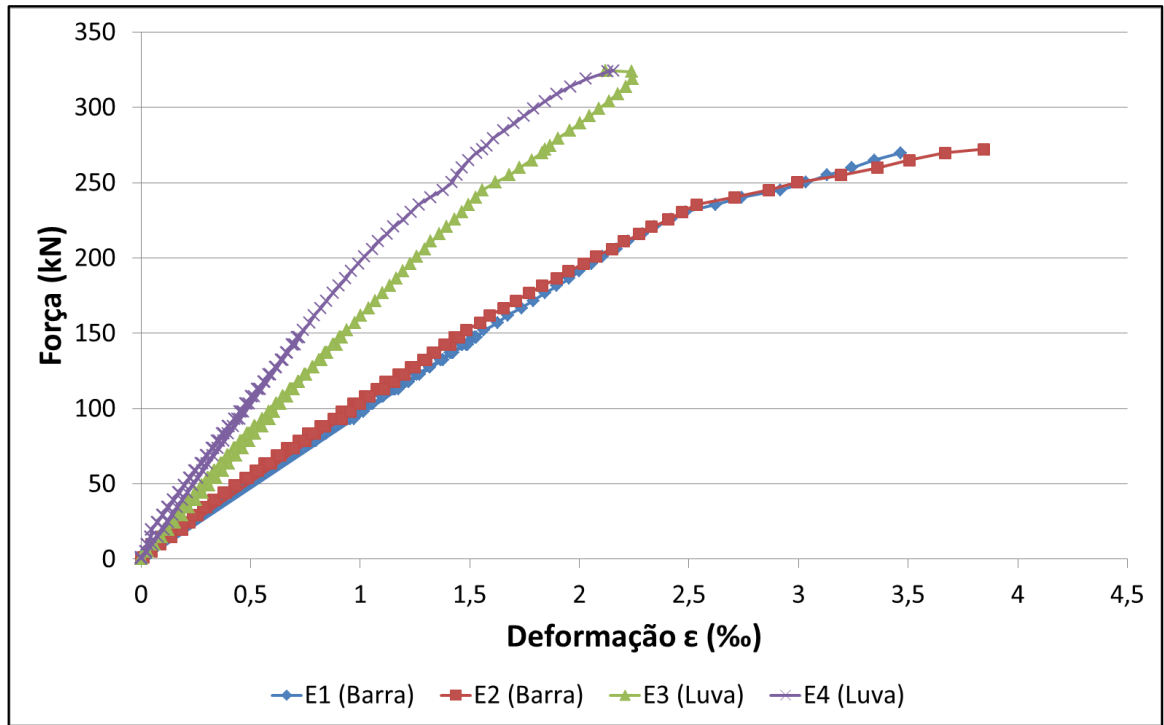
**RC-25mm-5 – Método 2****RC-25mm-6 – Método 2**

### RC-25mm-7 – Método 3



### RC-25mm-8 – Método 3

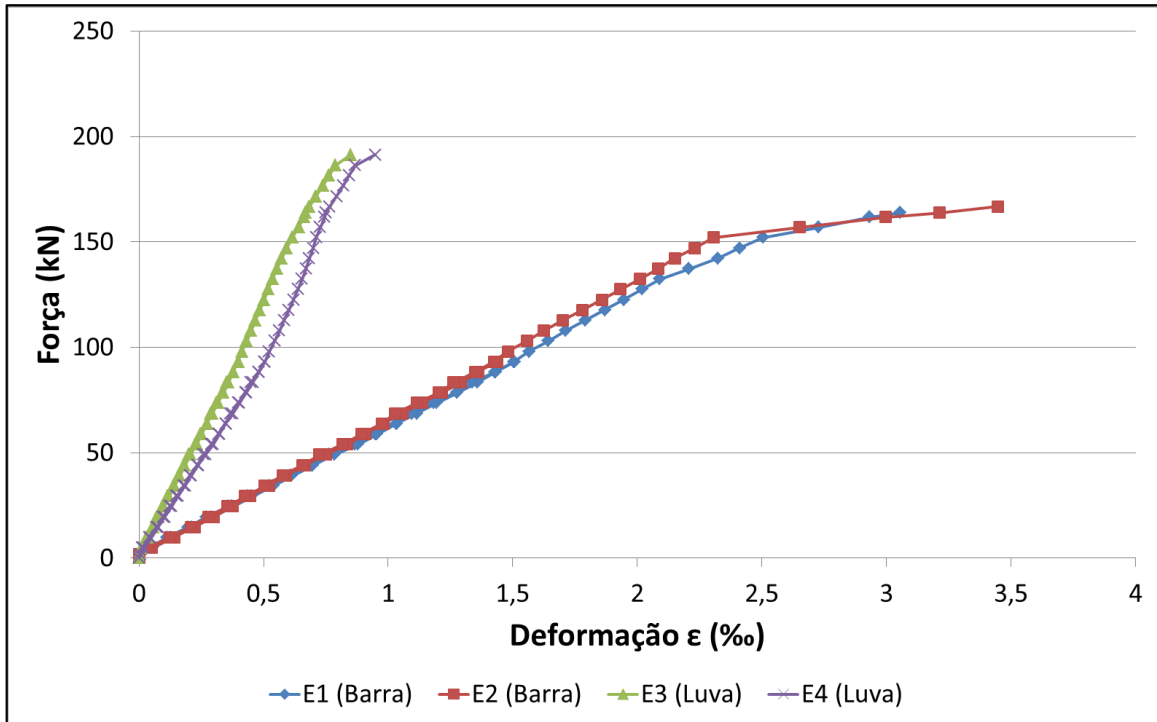


**RC-25mm-9 – Método 3**

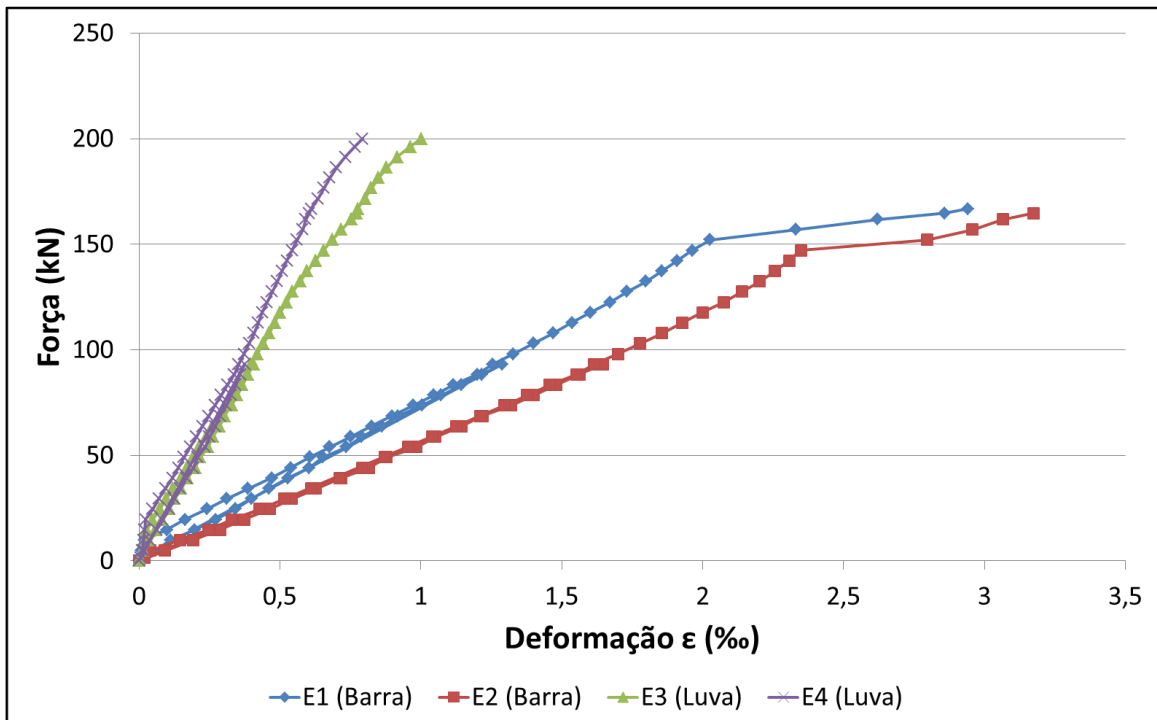


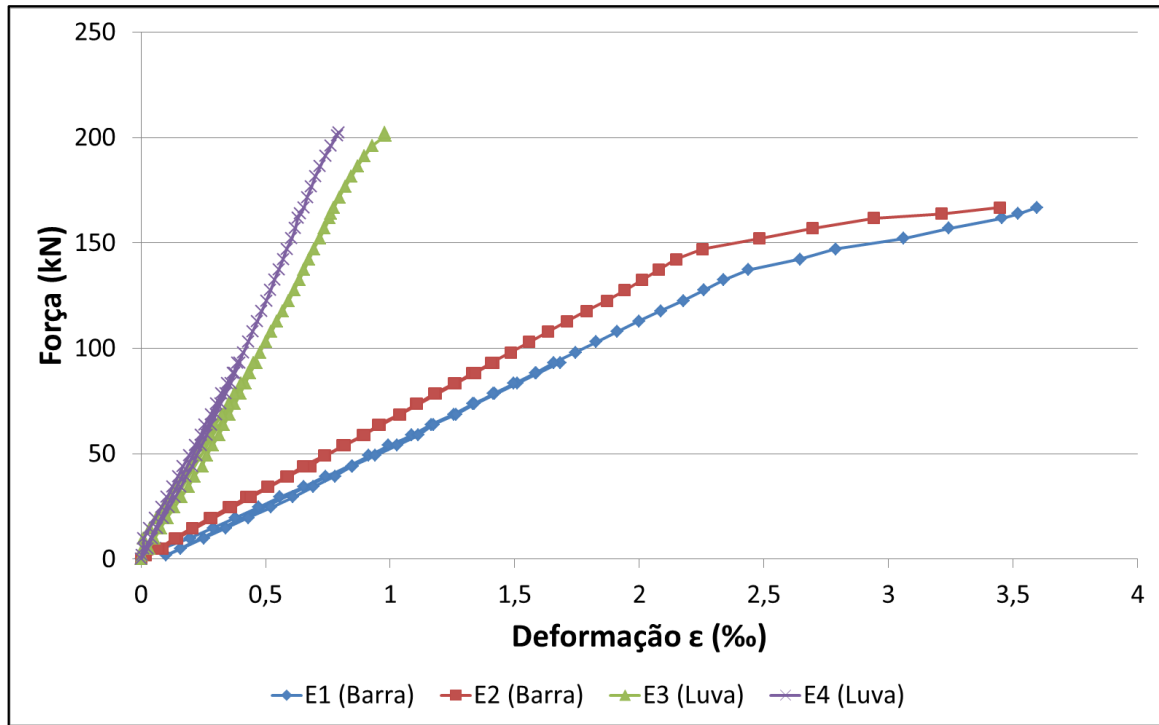
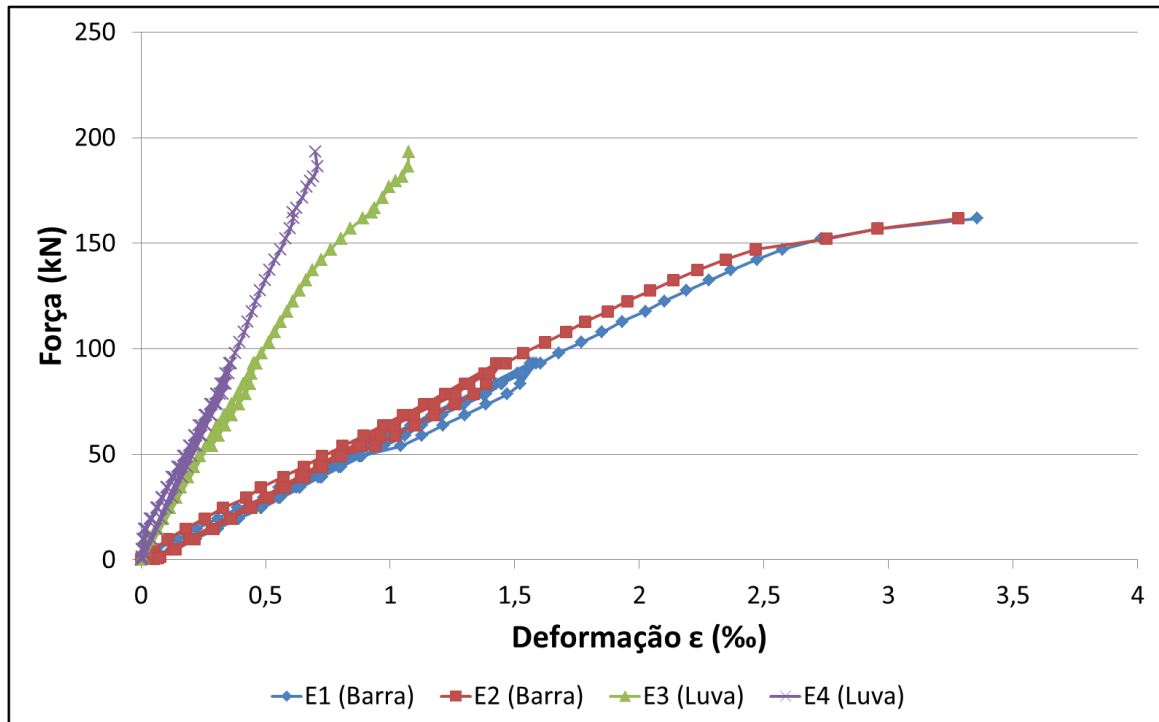
## Luva Parafusada 20 mm

### PAR-20mm-1 – Método 1

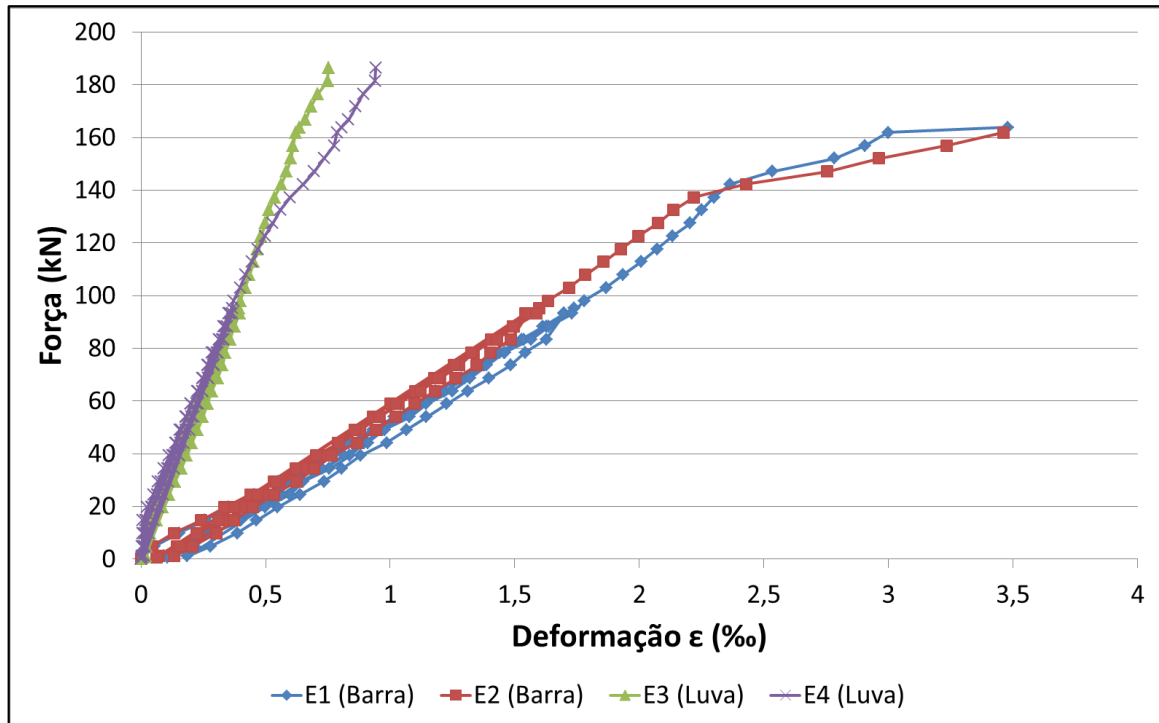


### PAR-20mm-2 – Método 1

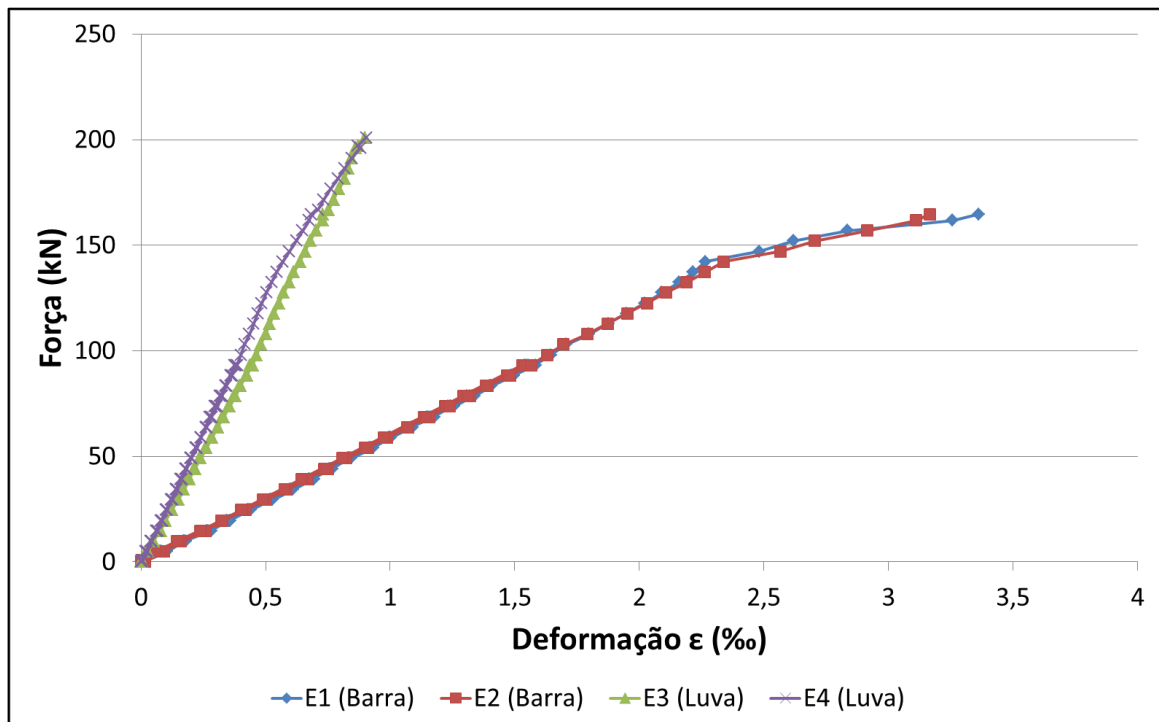


**PAR-20mm-3 – Método 1****PAR-20mm-4 – Método 2**

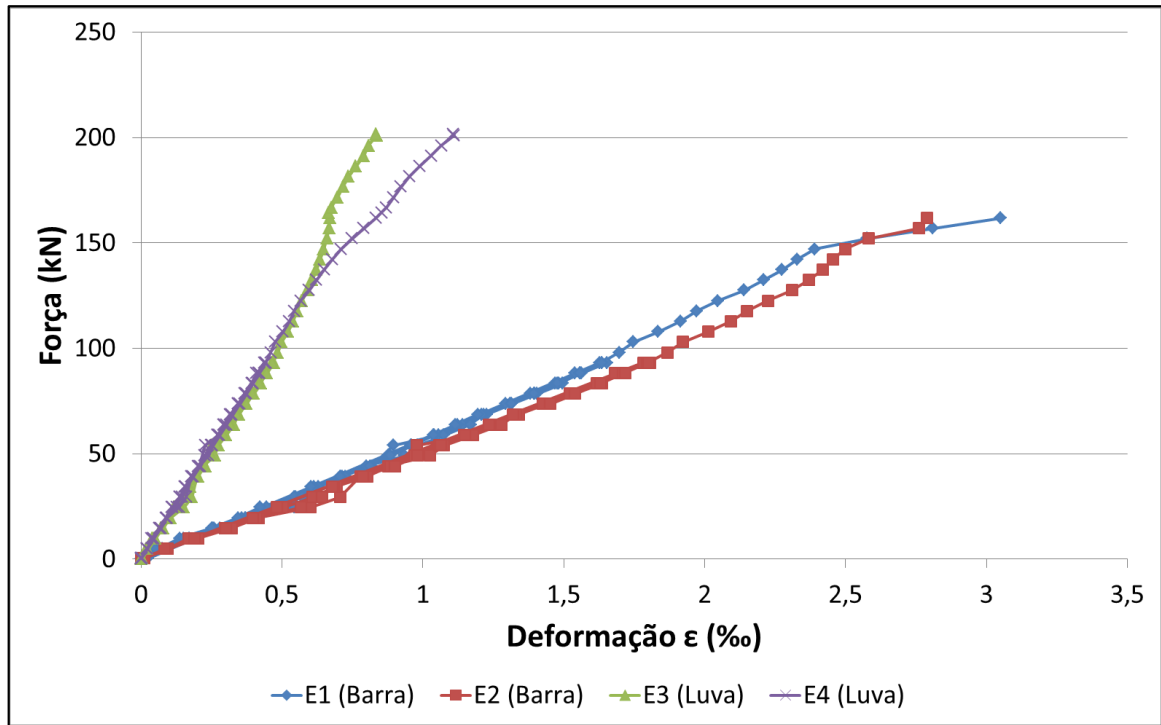
### PAR-20mm-5 – Método 2



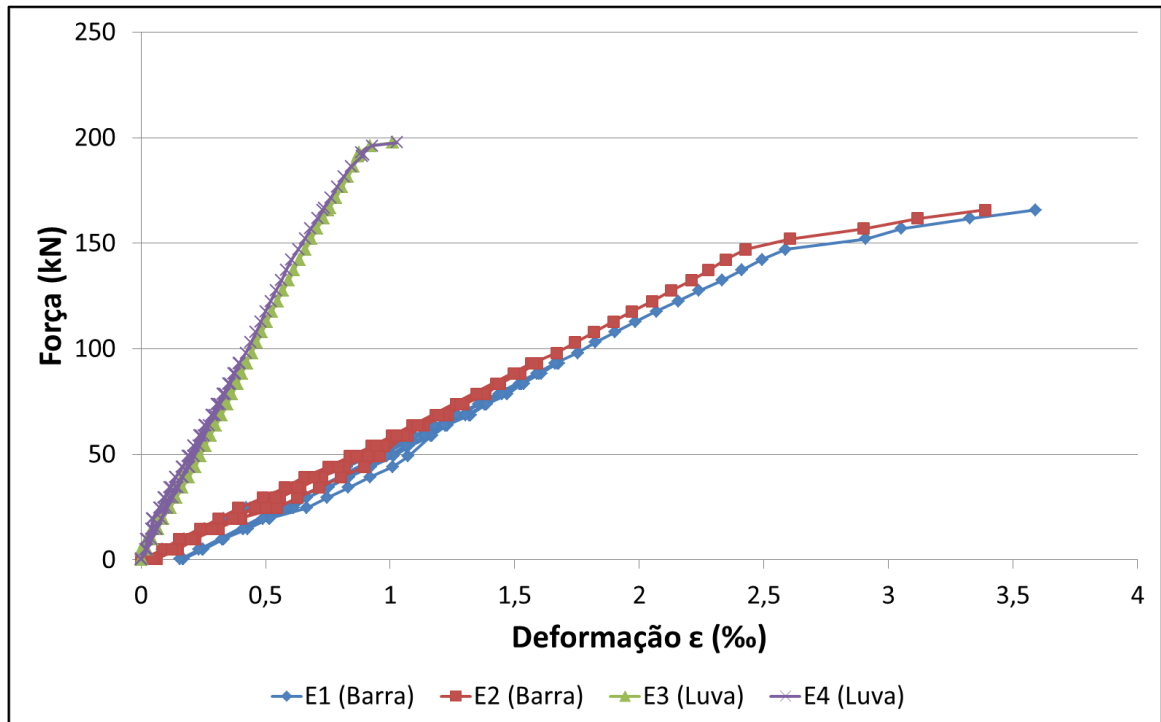
### PAR-20mm-6 – Método 2

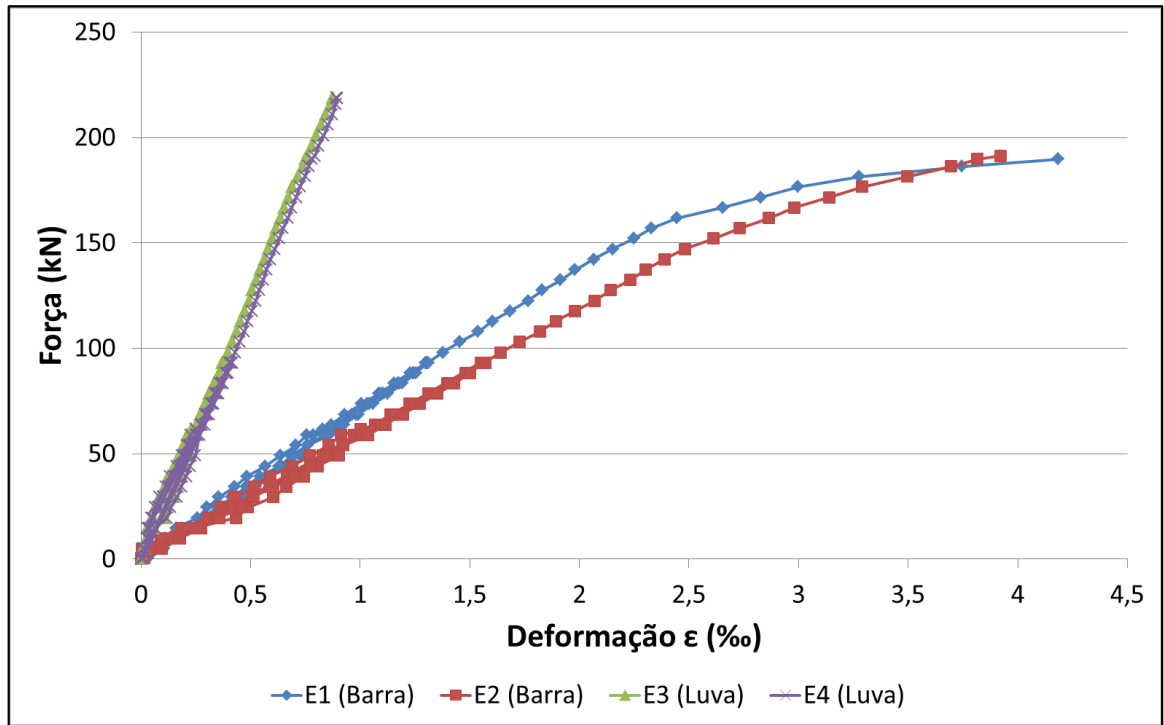


### PAR-20mm-7 – Método 3



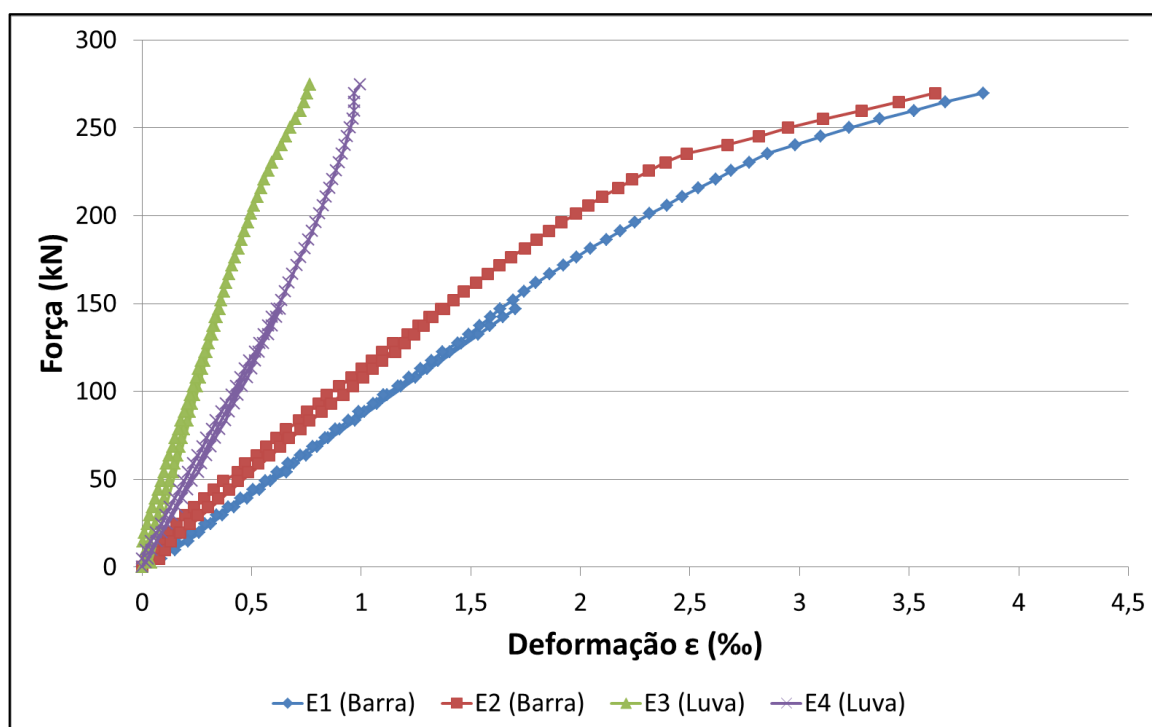
### PAR-20mm-8 – Método 3



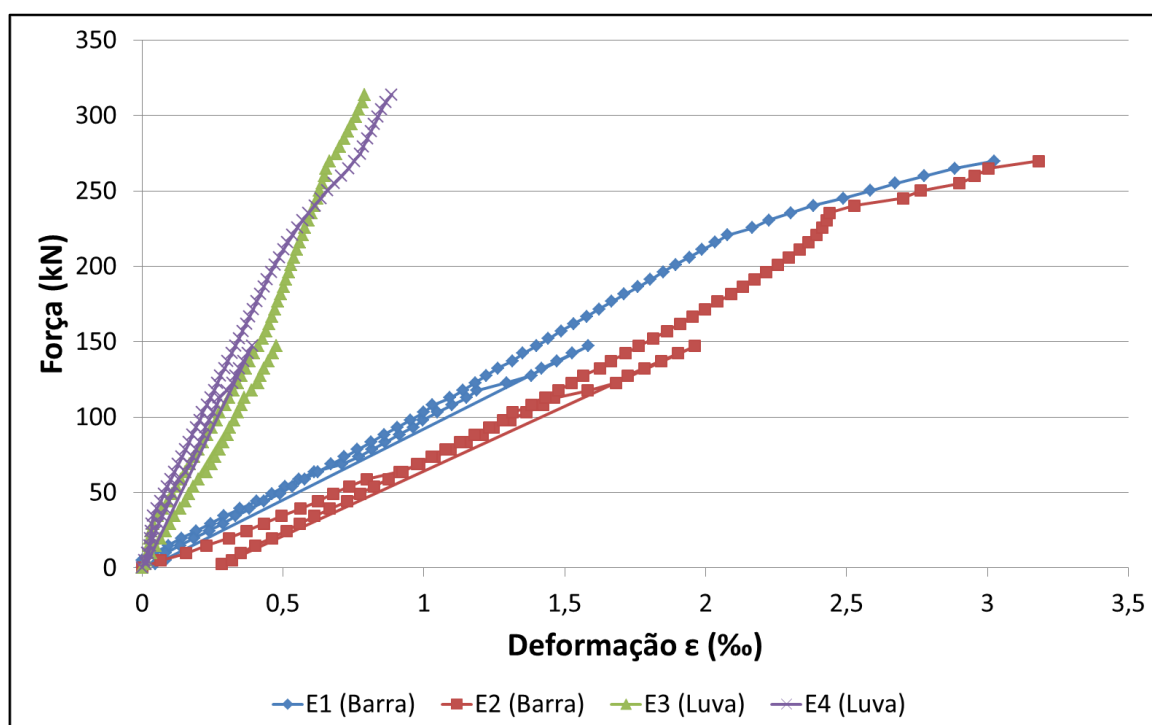
**PAR-20mm-9 – Método 3**

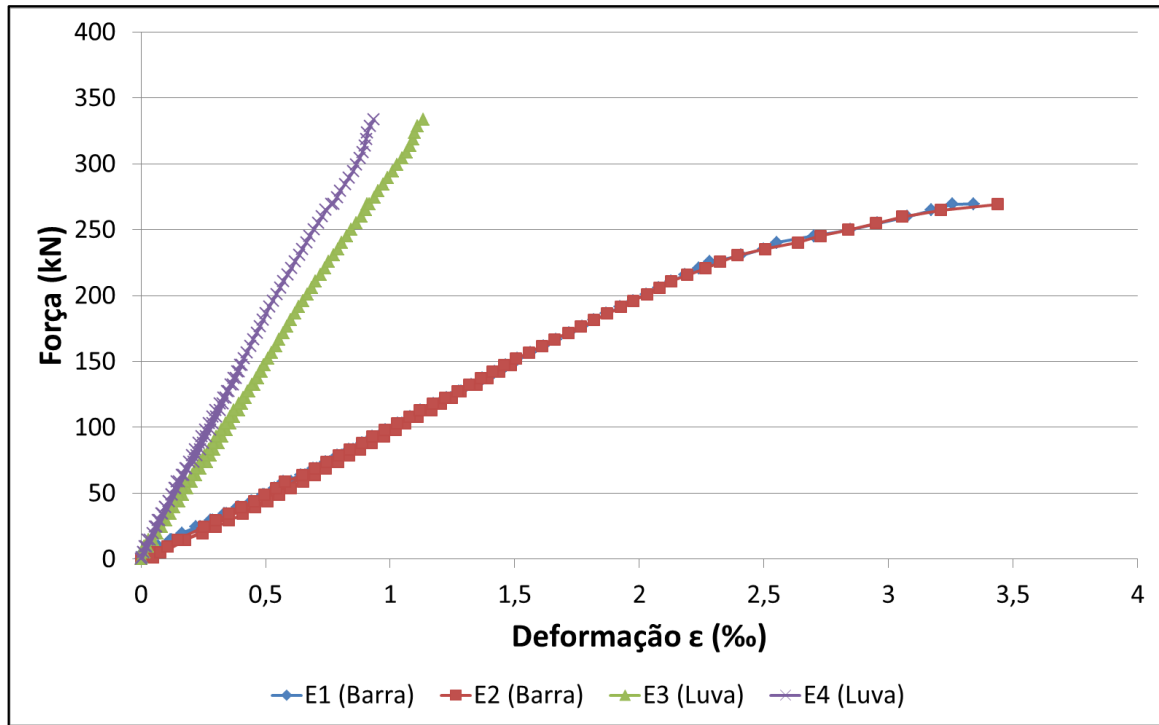
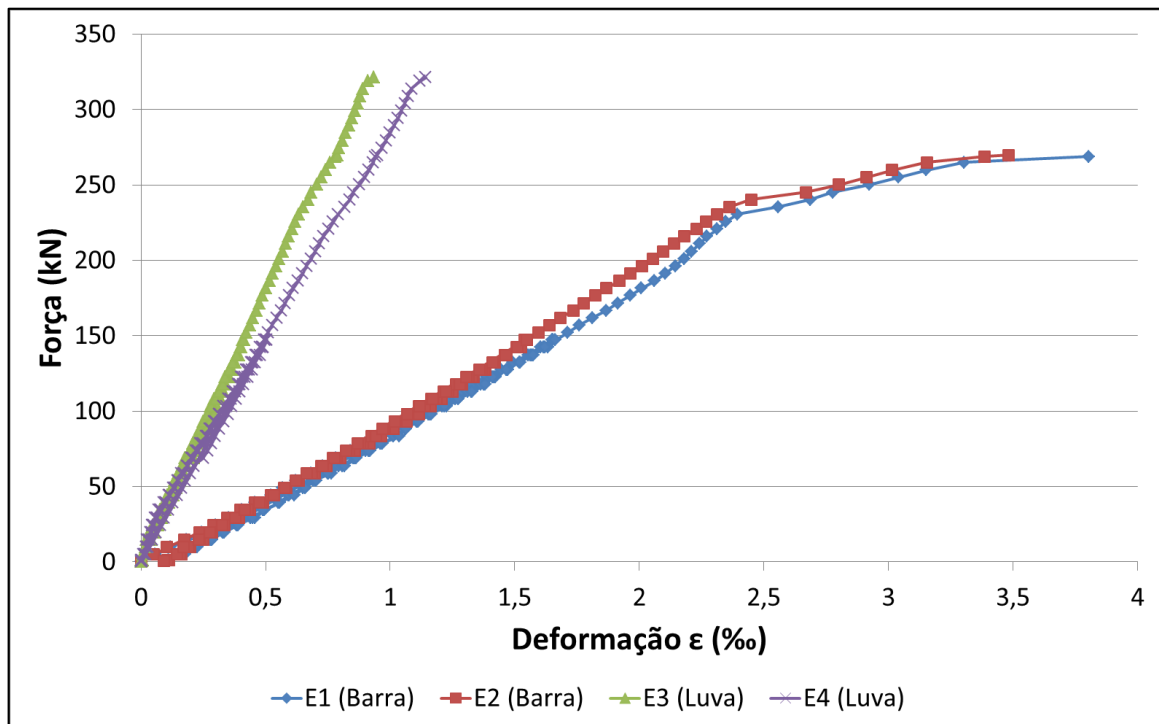
## Luva Parafusada 25 mm

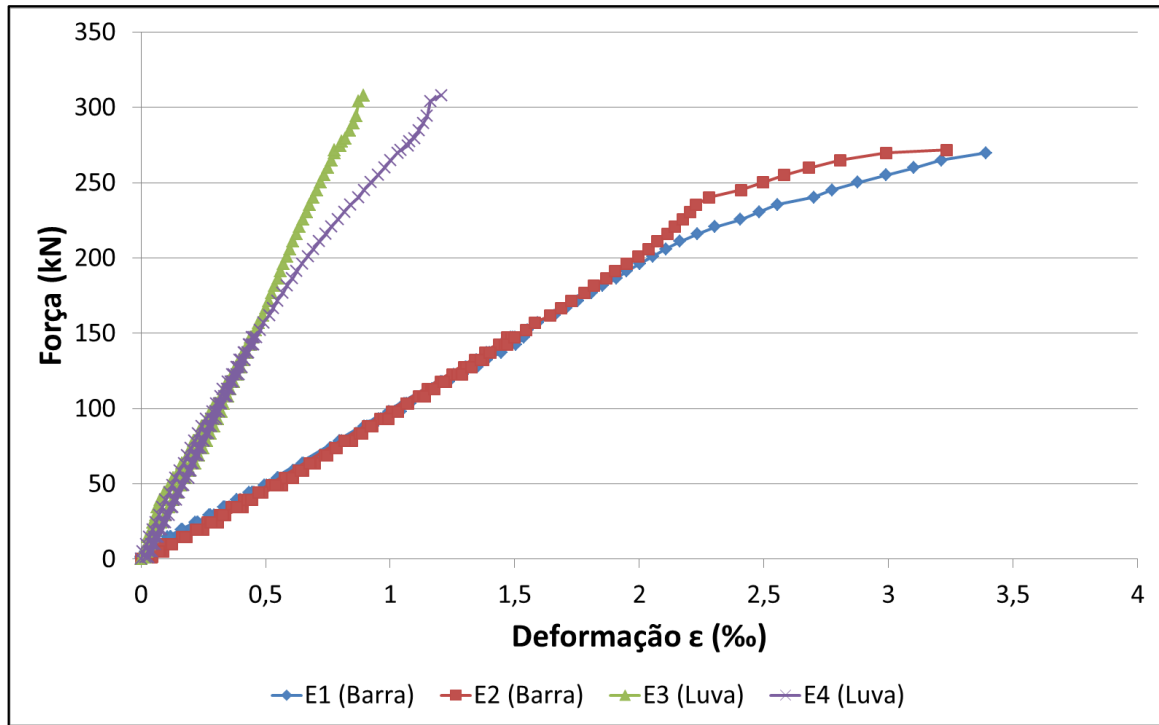
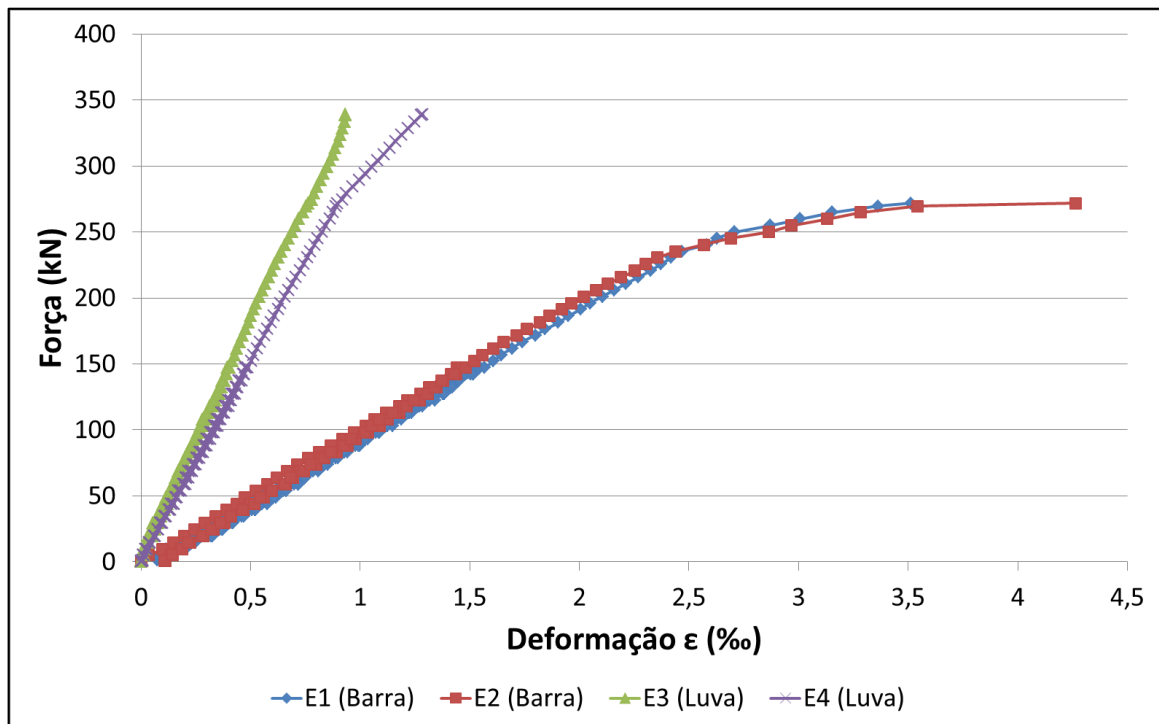
### PAR-25mm-1 – Método 1



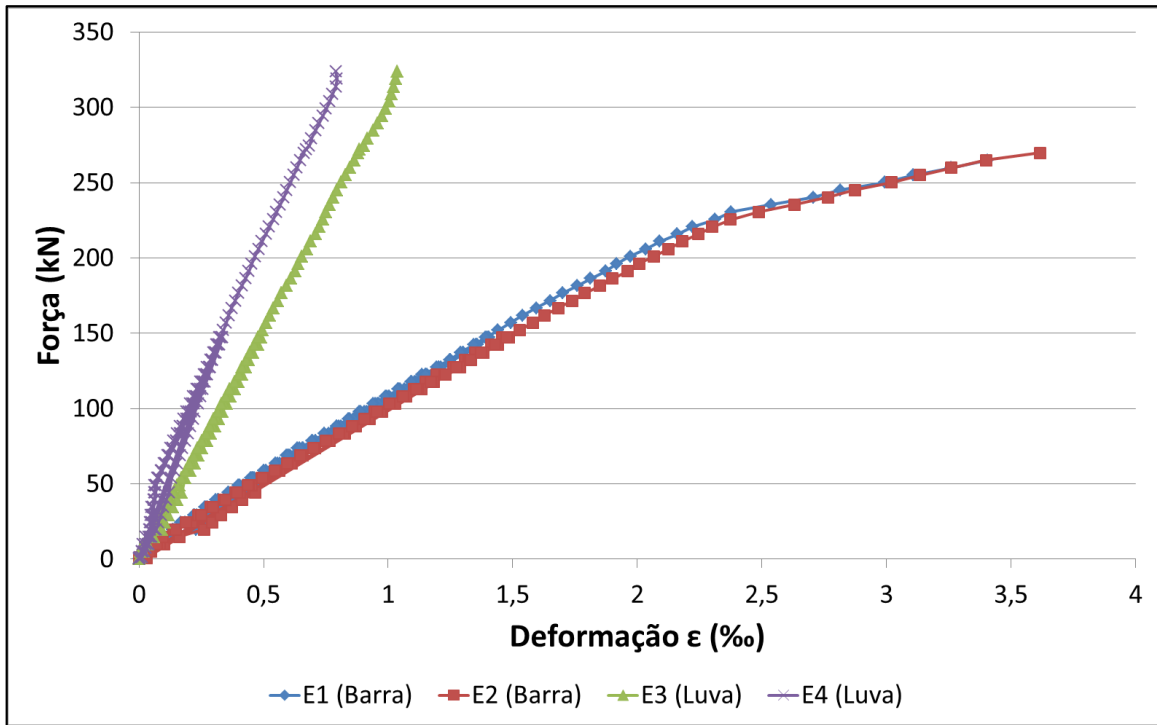
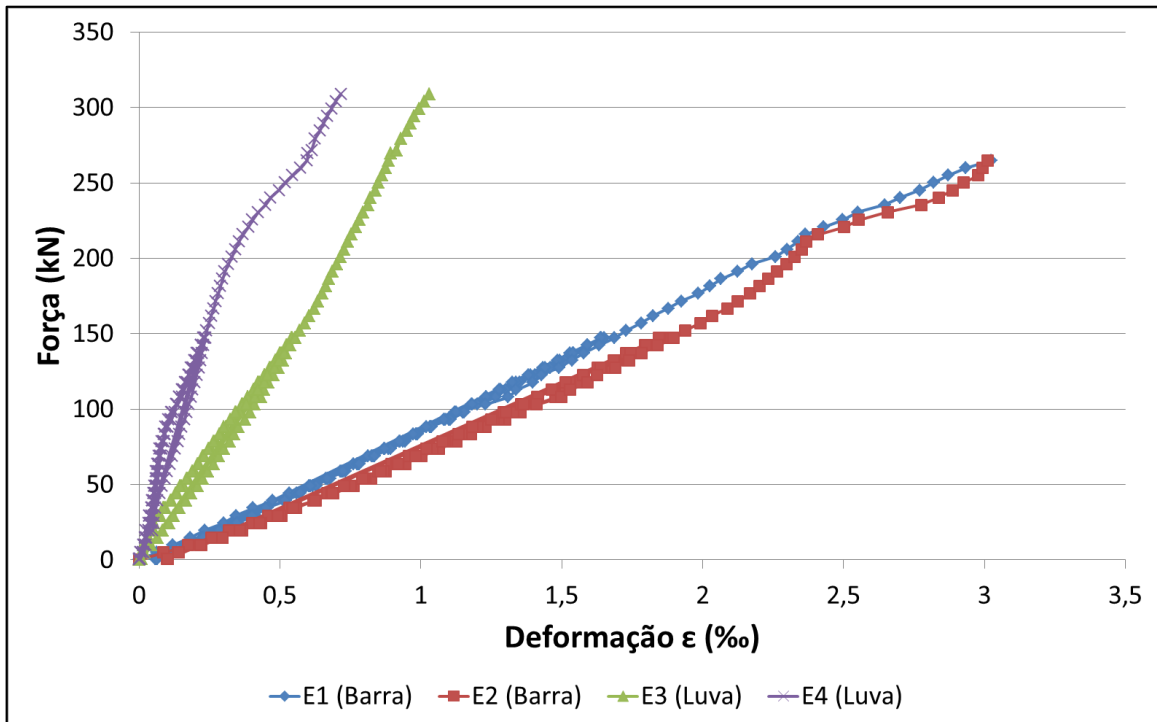
### PAR-25mm-2 – Método 1

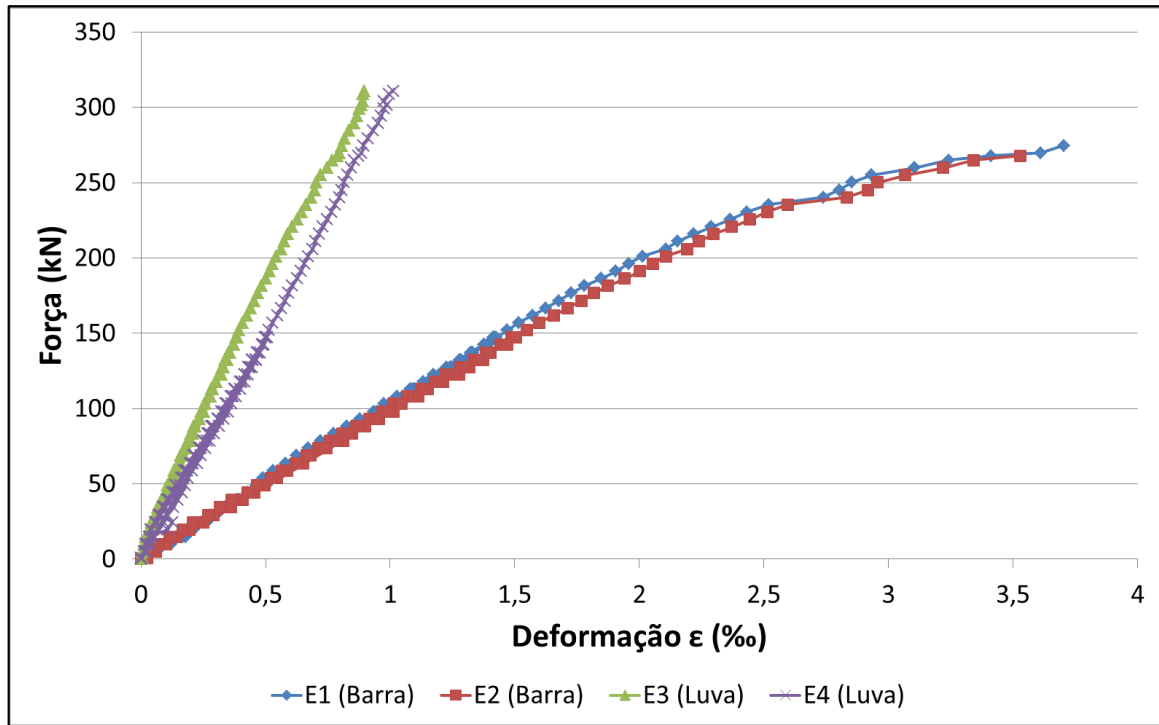


**PAR-25mm-3 – Método 1****PAR-25mm-4 – Método 2**

**PAR-25mm-5 – Método 2****PAR-25mm-6 – Método 2**



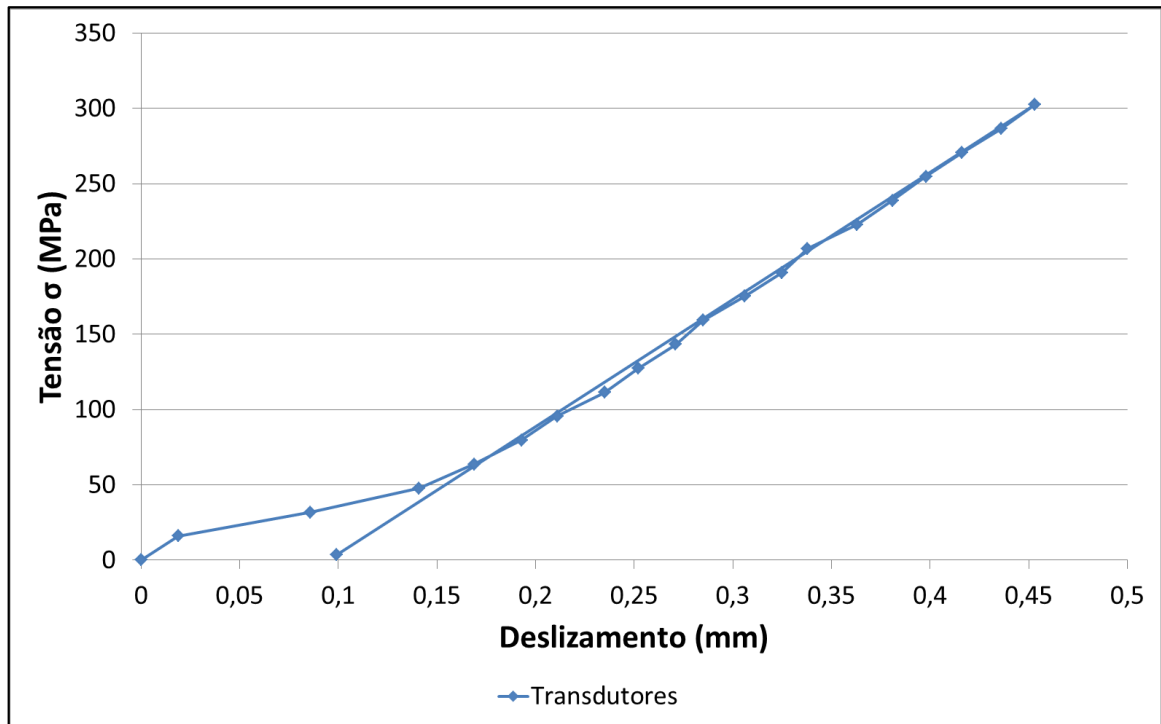
**PAR-25mm-7 – Método 3****PAR-25mm-8 – Método 3**

**PAR-25mm-9 – Método 3**

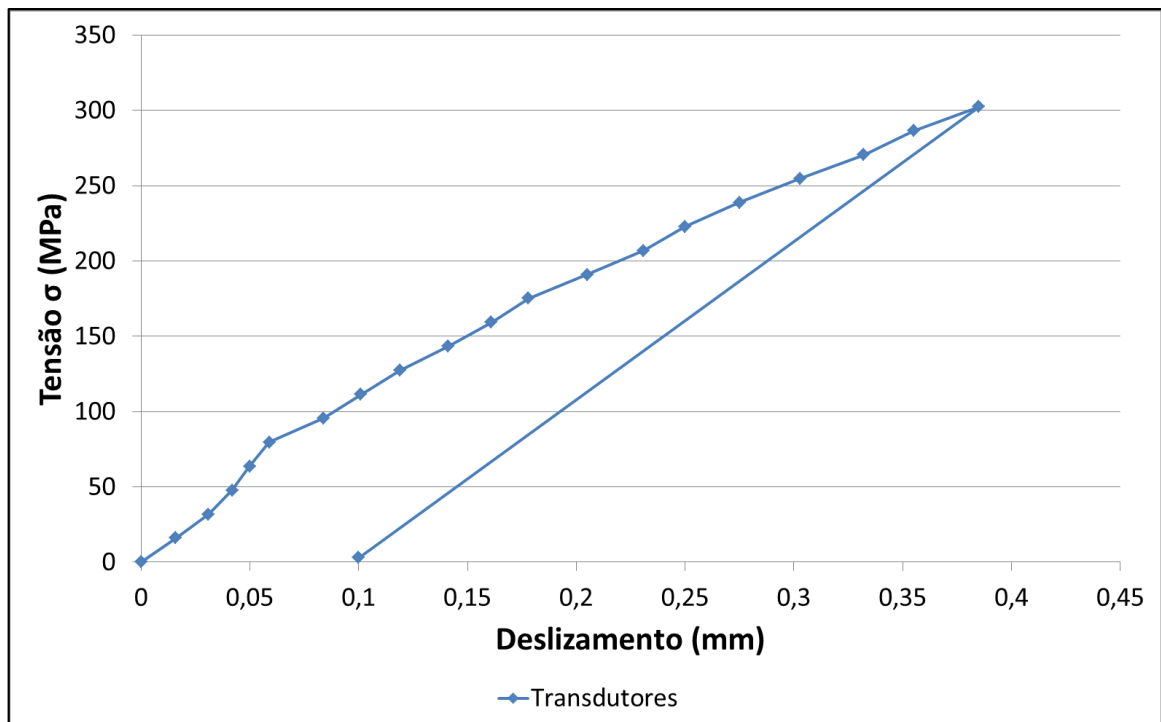
**APÊNDICE C - CURVAS TENSÃO *VERSUS* DESLIZAMENTO**

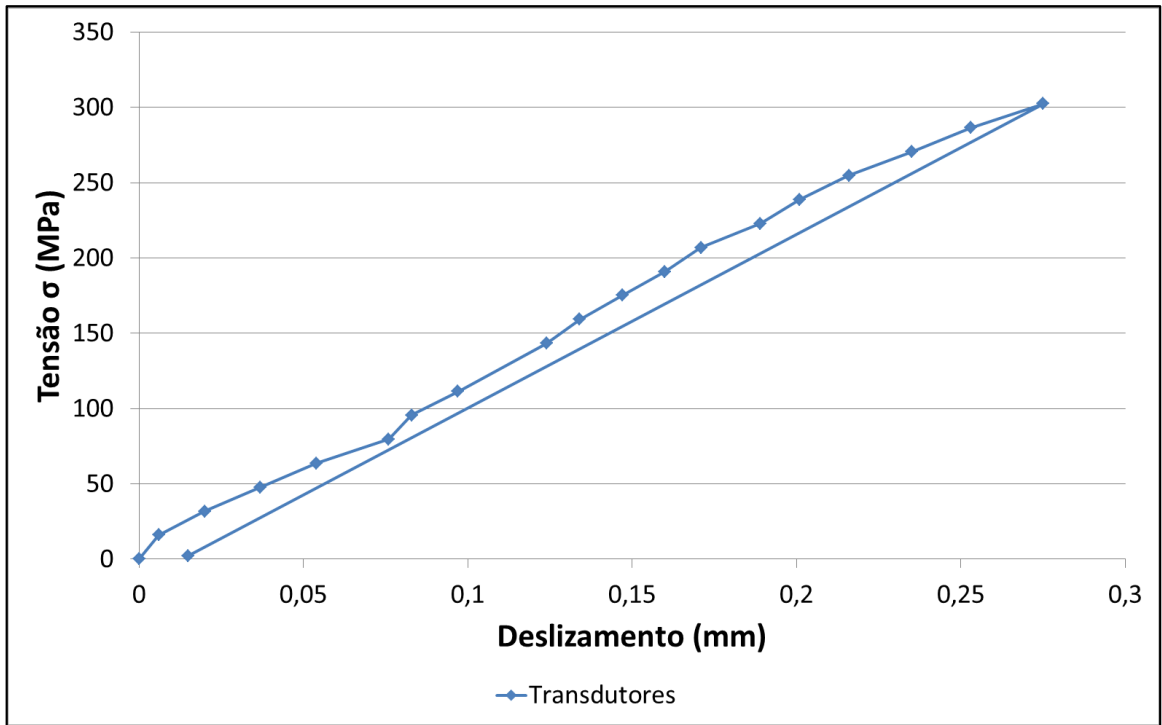
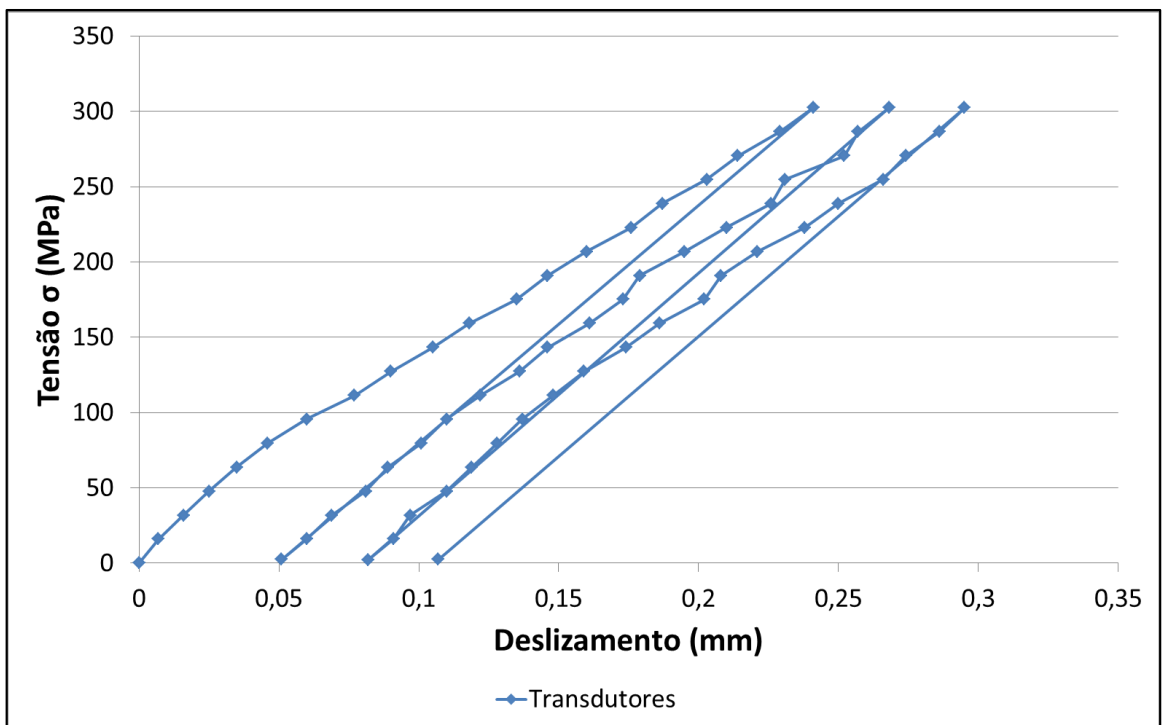
## Luva de Rosca Cônica 20 mm

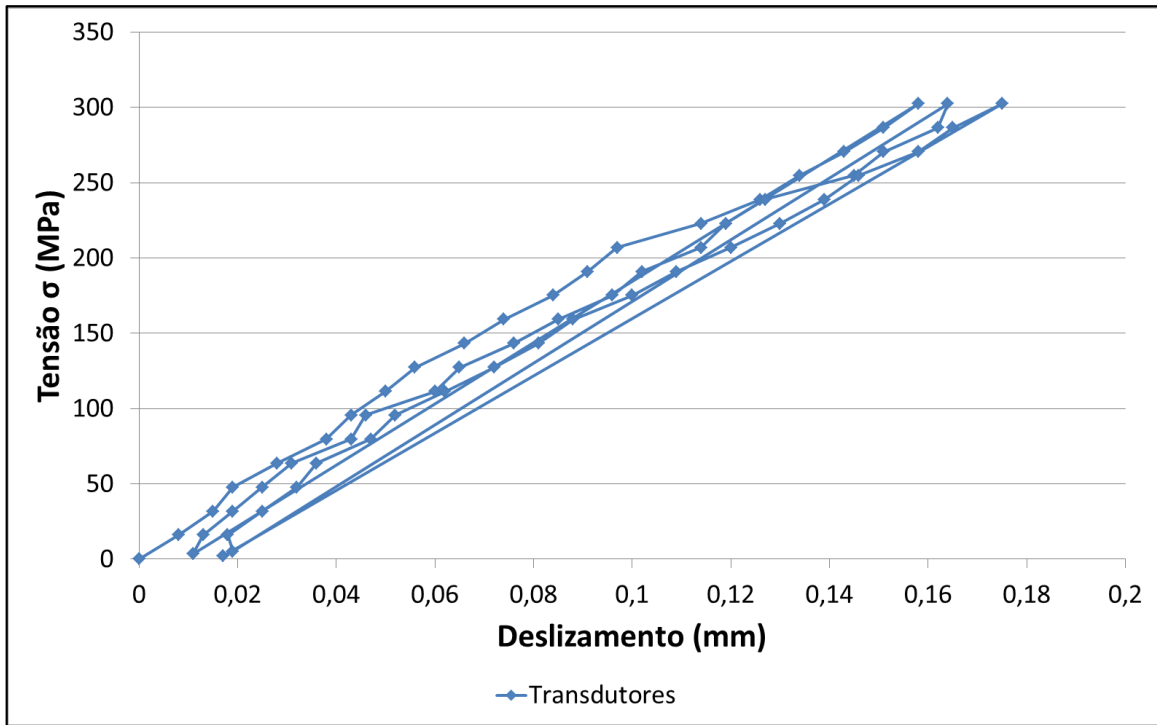
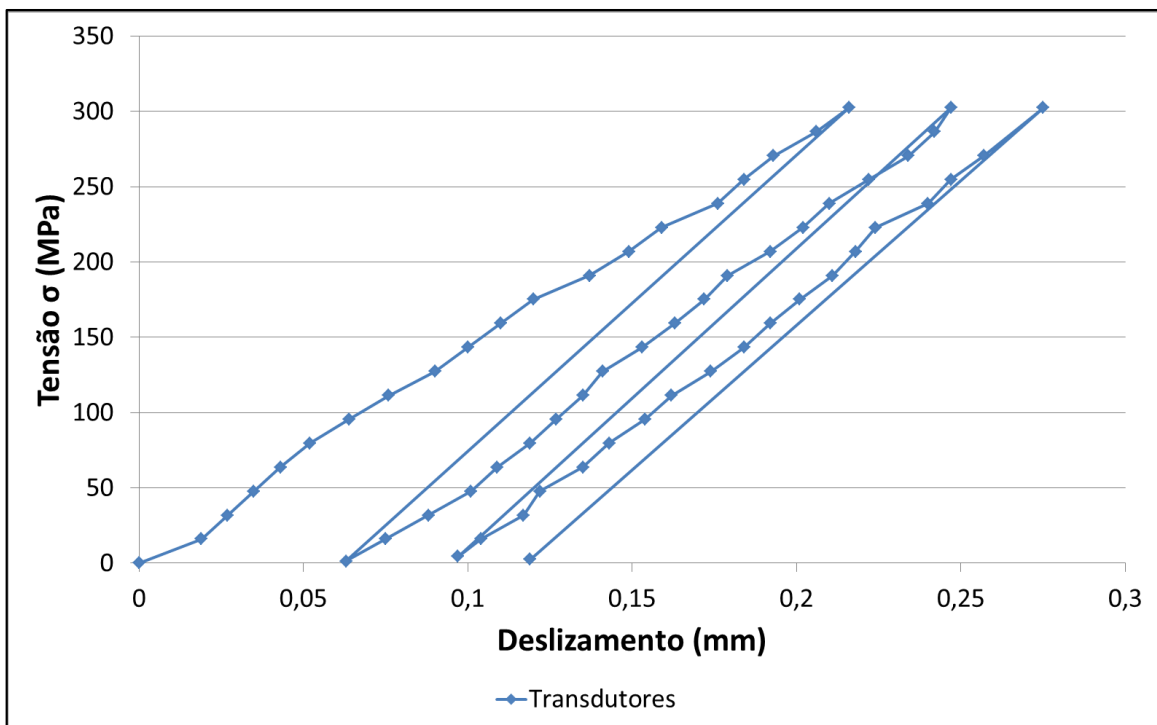
### RC-20mm-1 – Método 1

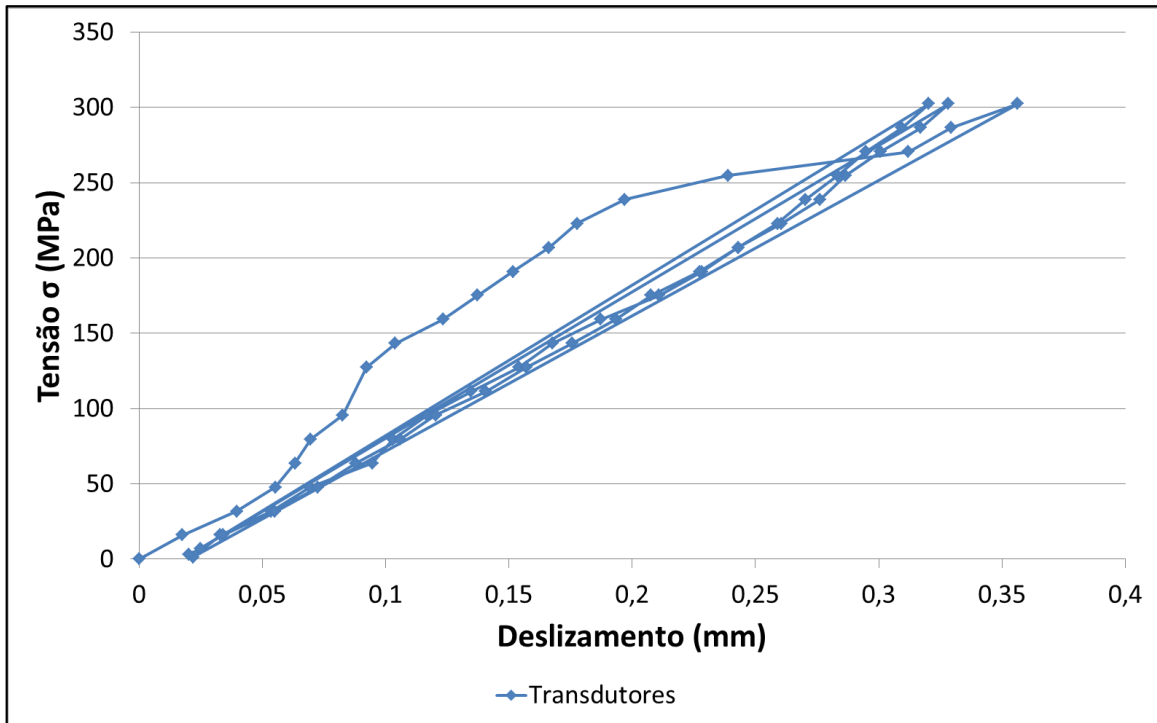
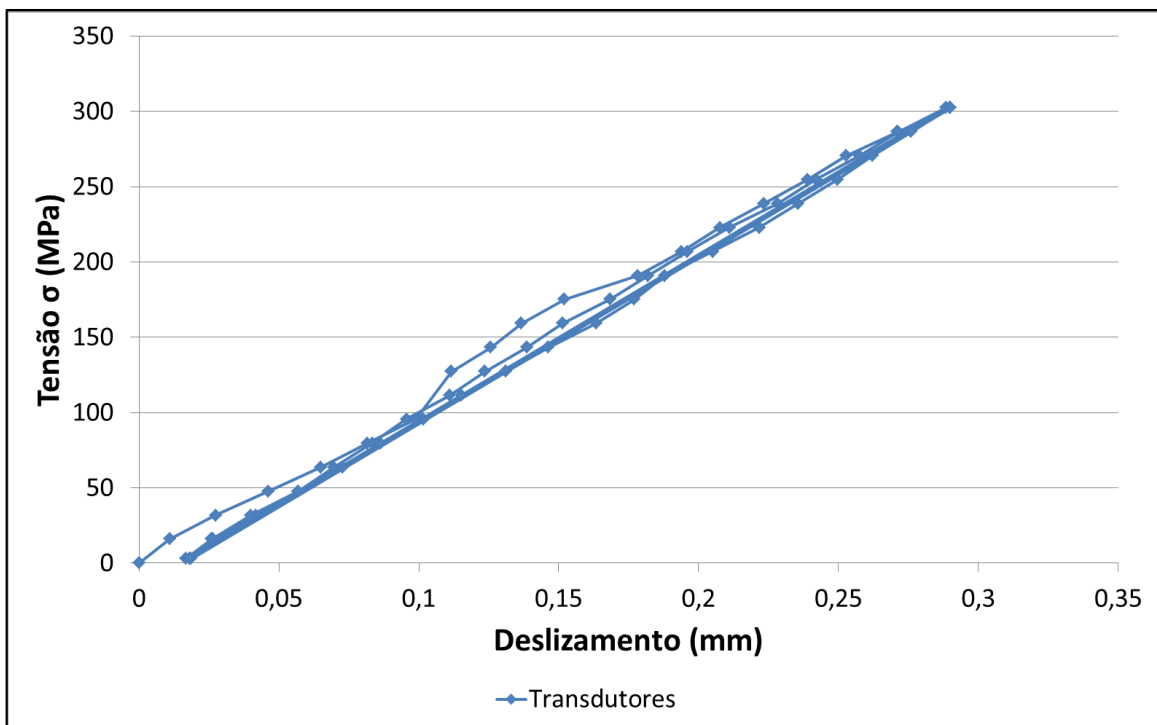


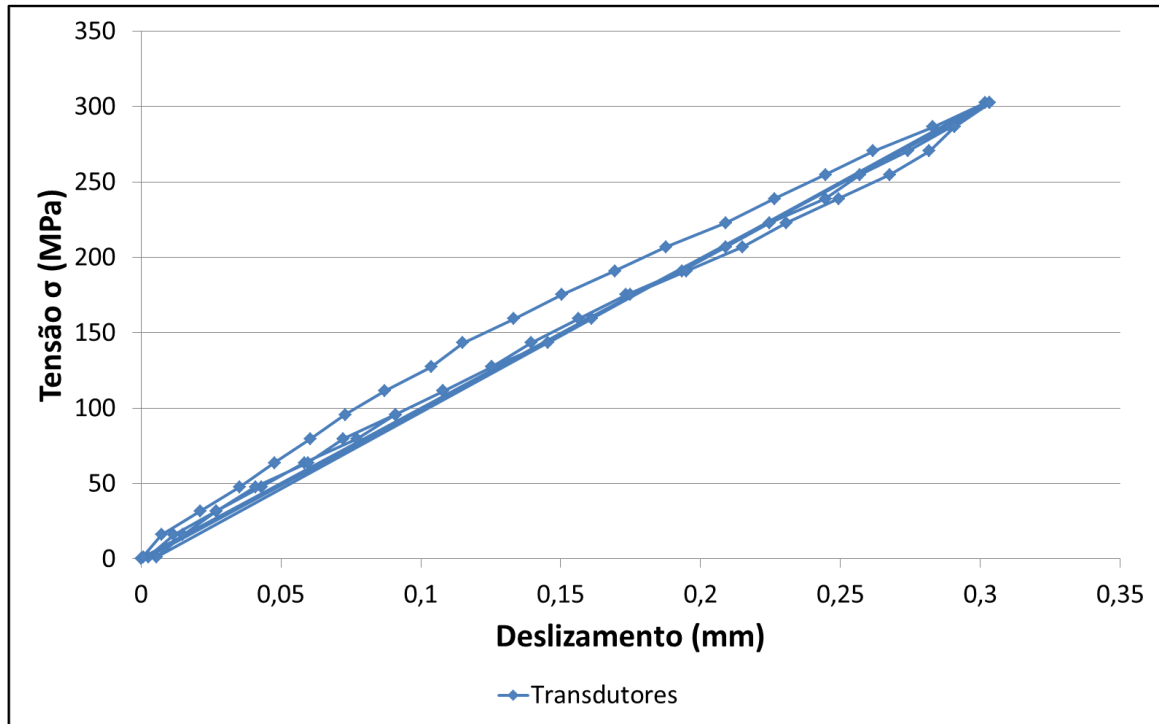
### RC-20mm-2 – Método 1



**RC-20mm-3 – Método 1****RC-20mm-4 – Método 2**

**RC-20mm-5 – Método 2****RC-20mm-6 – Método 2**

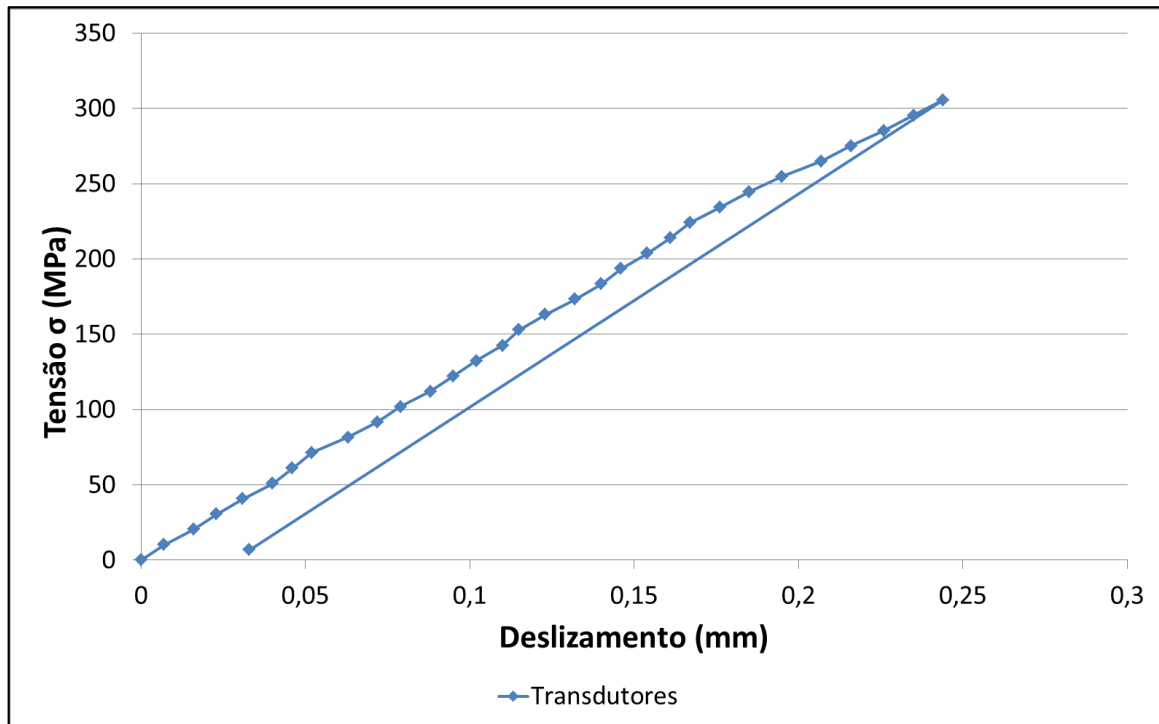
**RC-20mm-7 – Método 3****RC-20mm-8 – Método 3**

**RC-20mm-9 – Método 3**

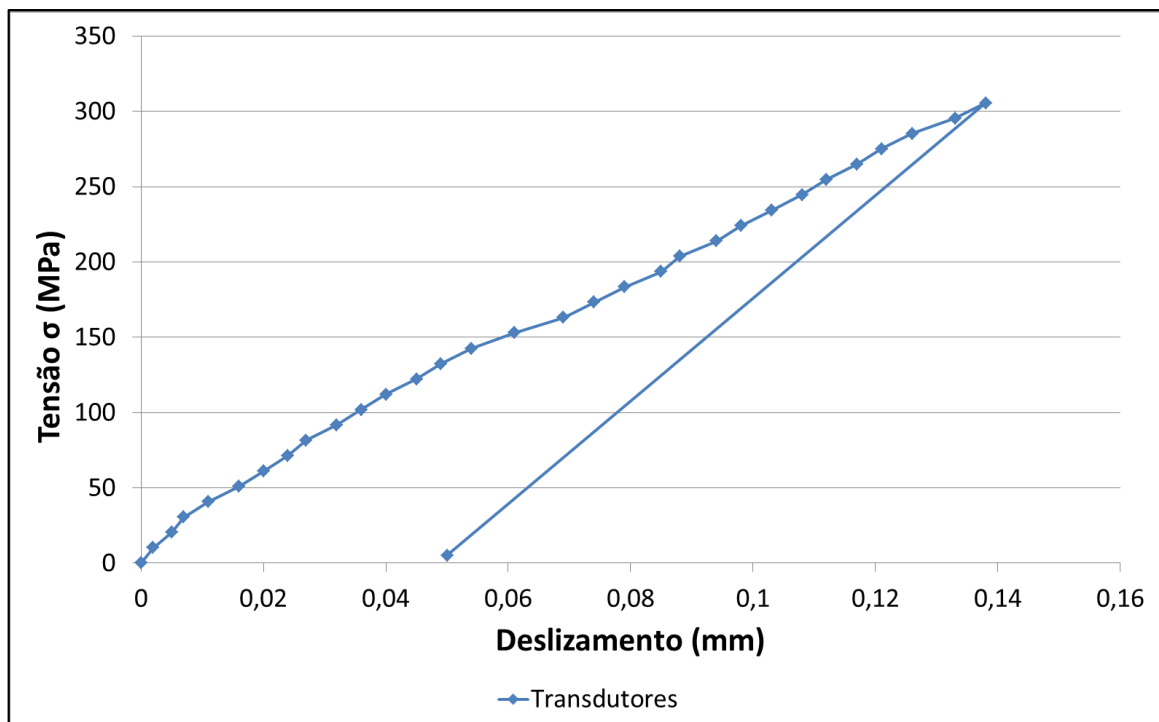


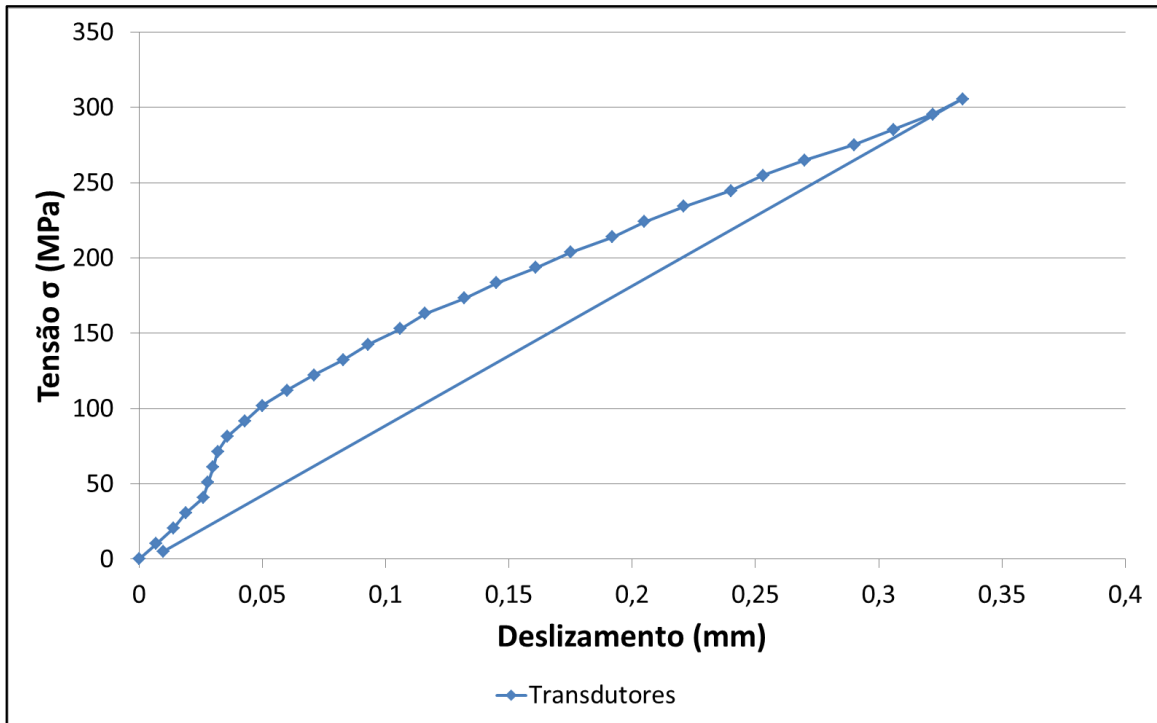
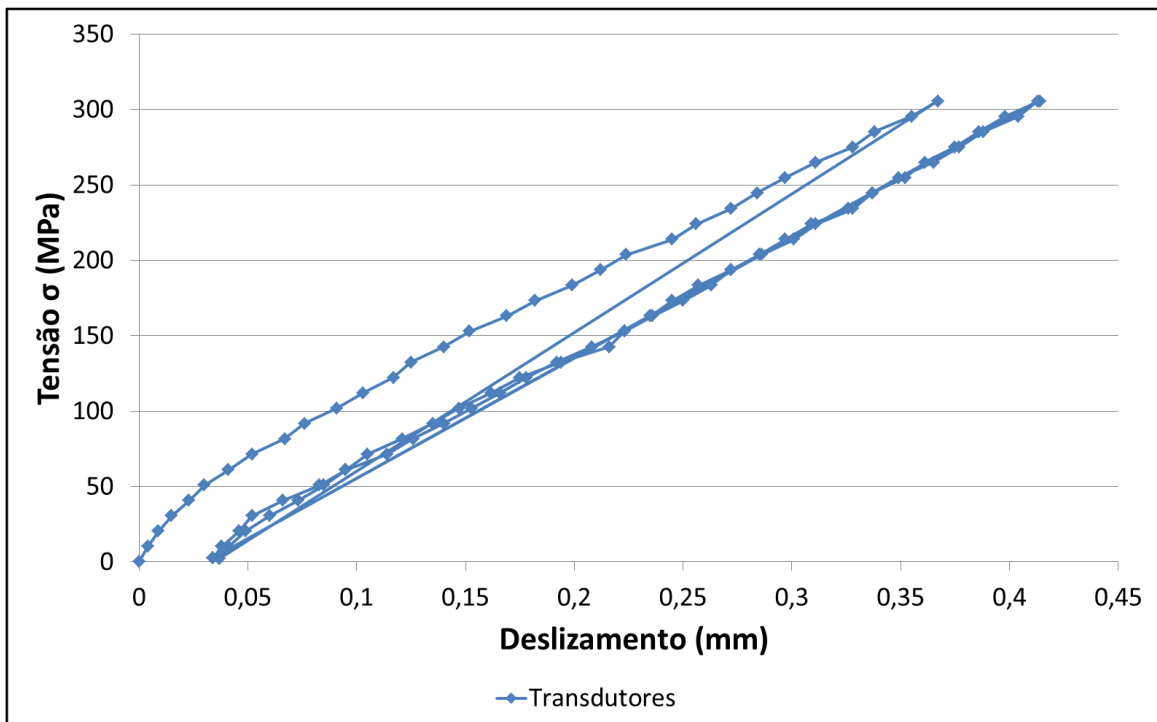
## Luva de Rosca Cônica 25 mm

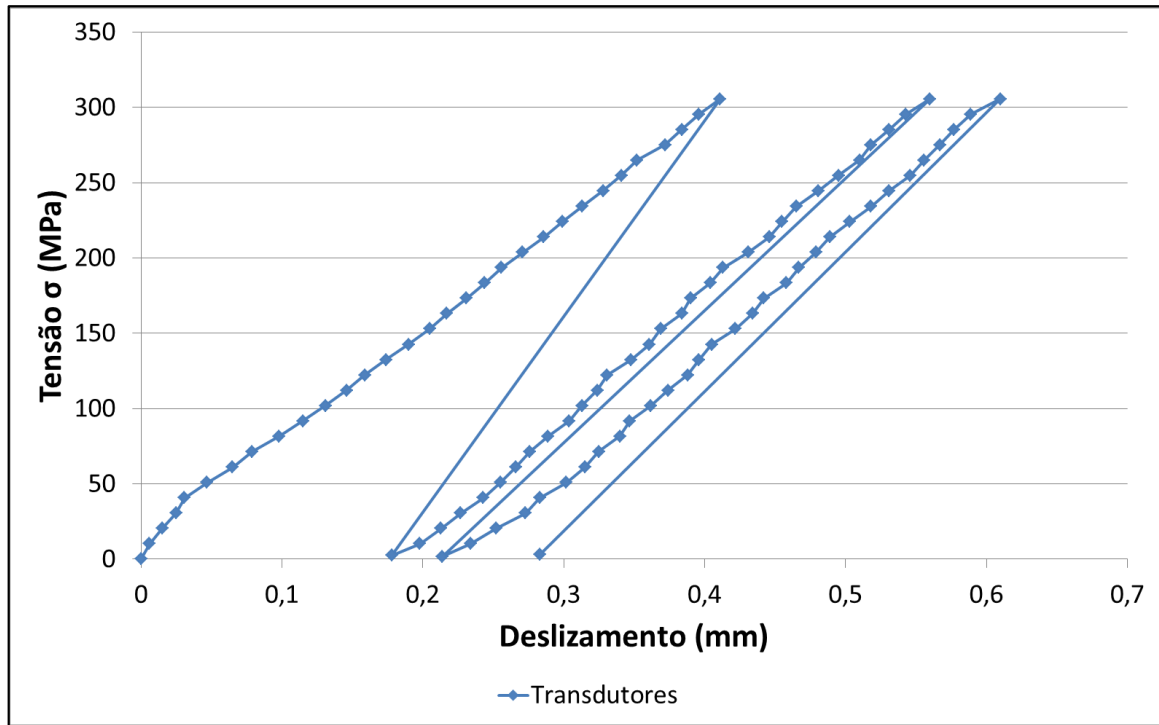
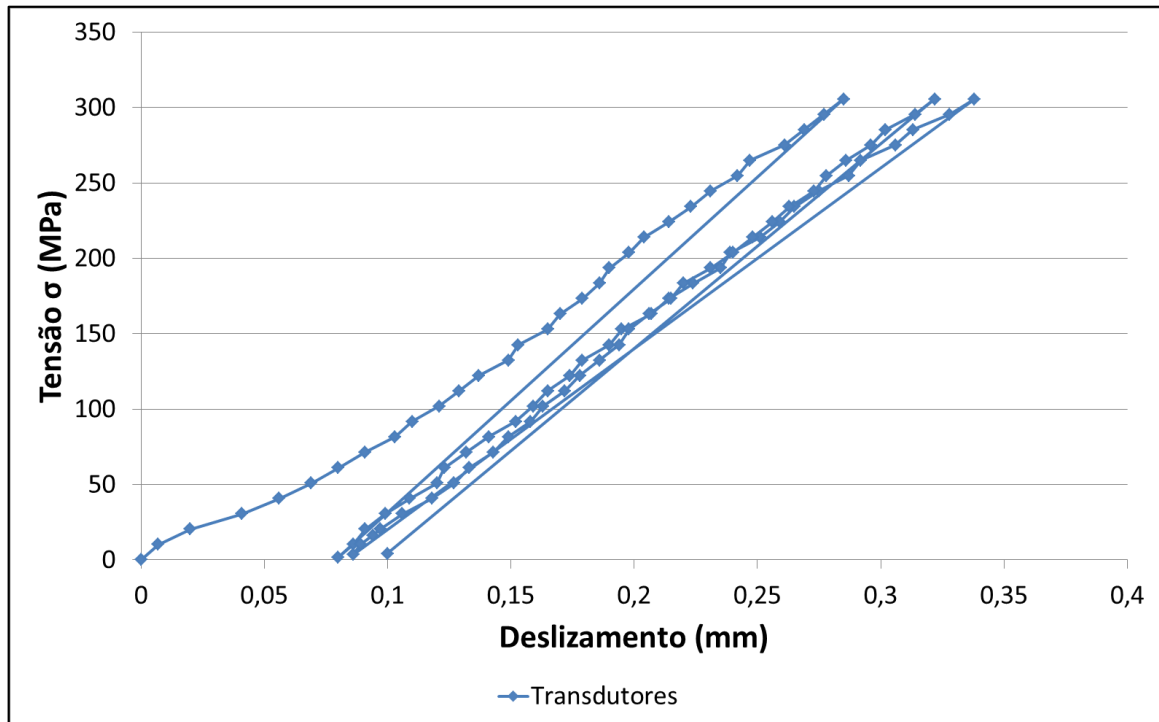
### RC-25mm-1 – Método 1

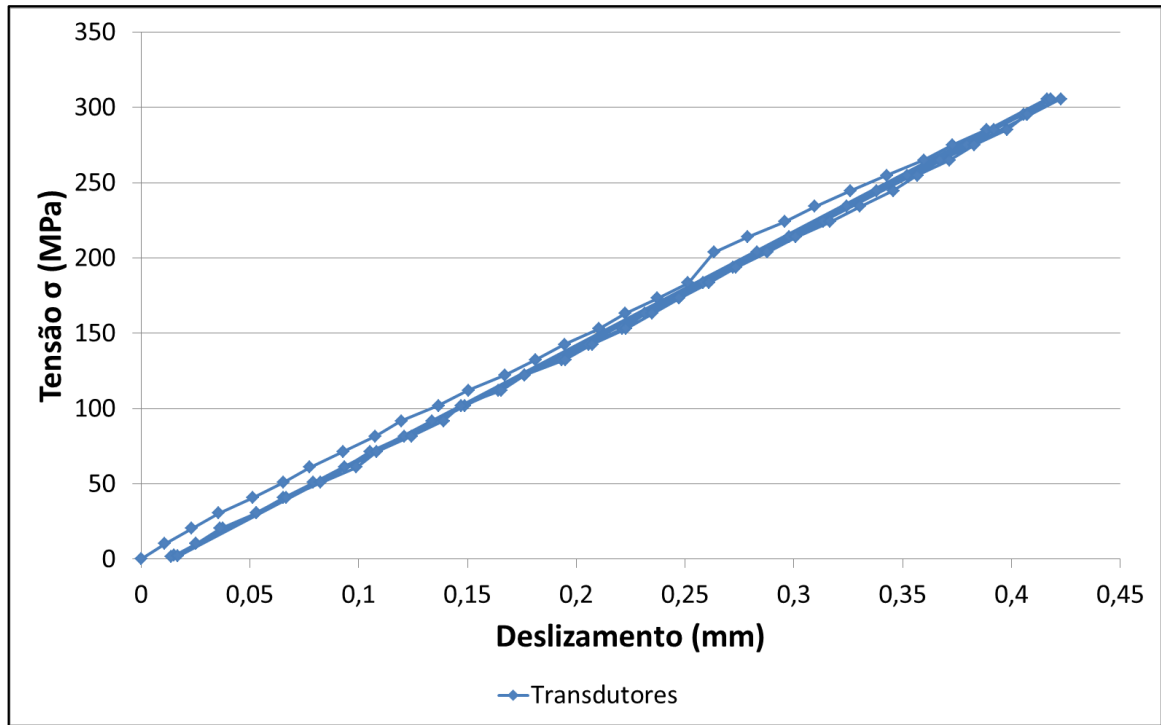
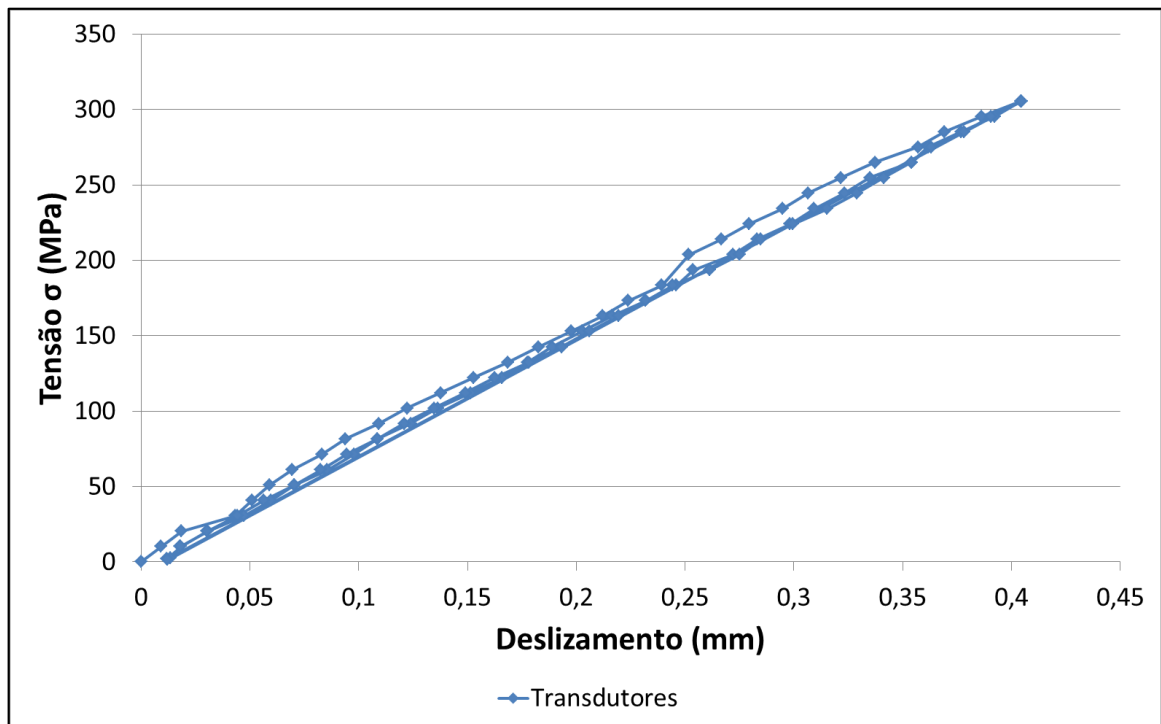


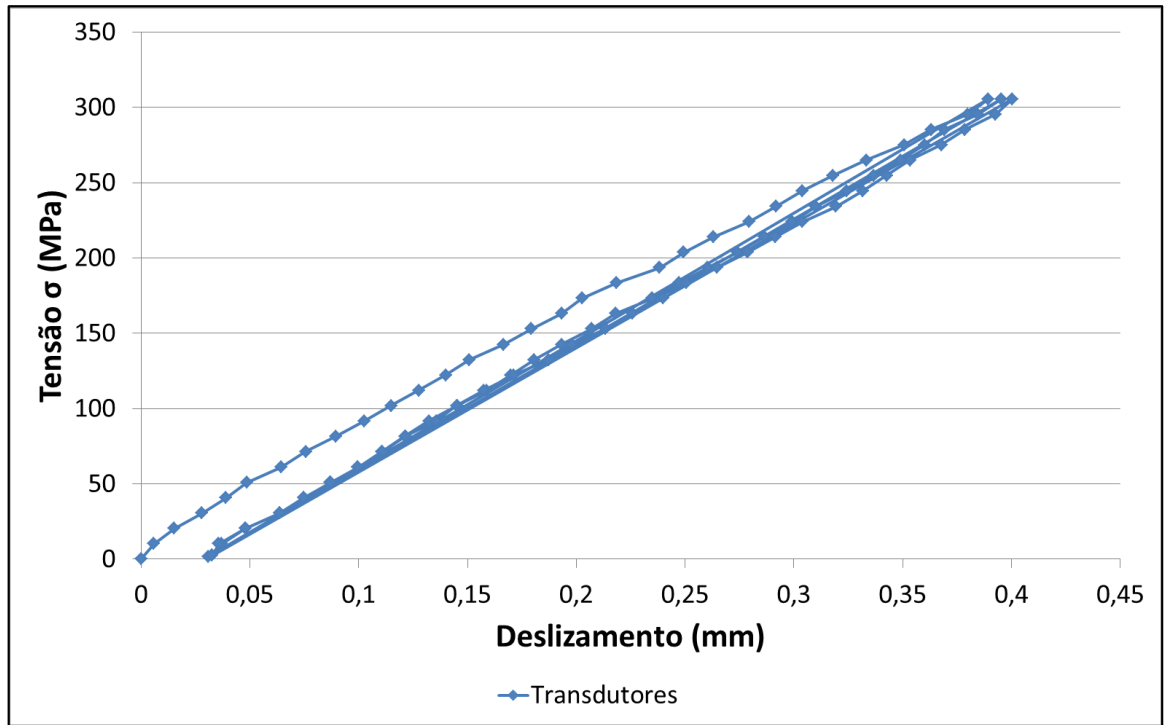
### RC-25mm-2 – Método 1



**RC-25mm-3 – Método 1****RC-25mm-4 – Método 2**

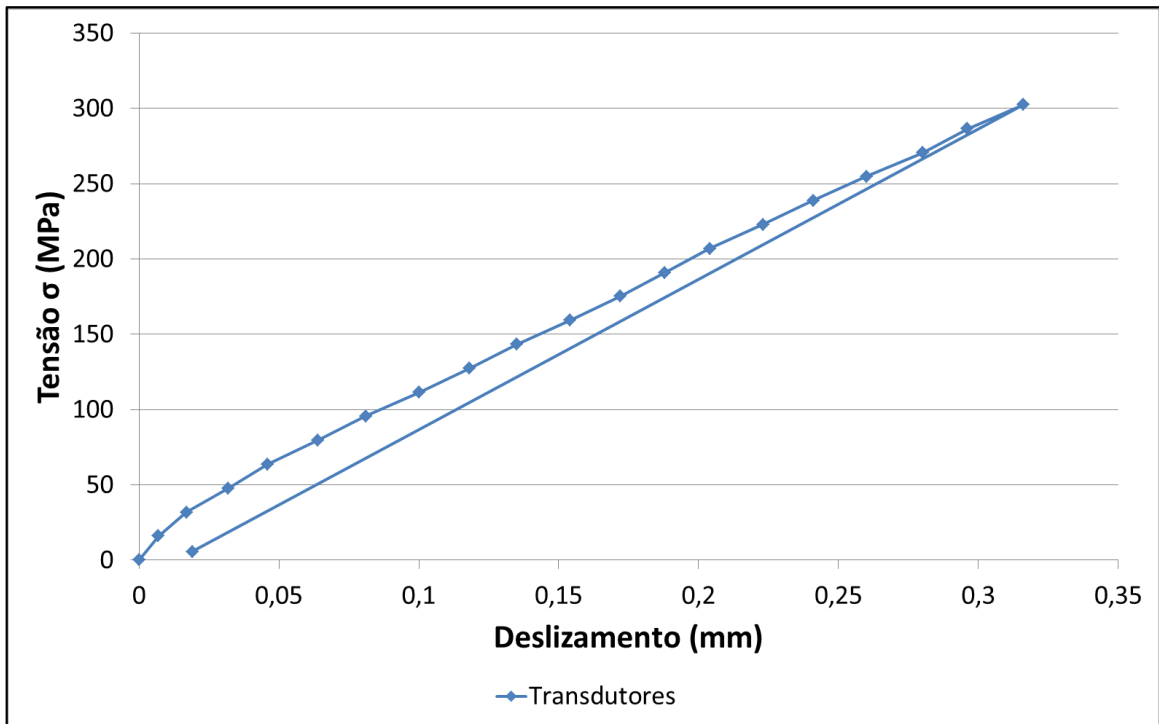
**RC-25mm-5 – Método 2****RC-25mm-6 – Método 2**

**RC-25mm-7 – Método 3****RC-25mm-8 – Método 3**

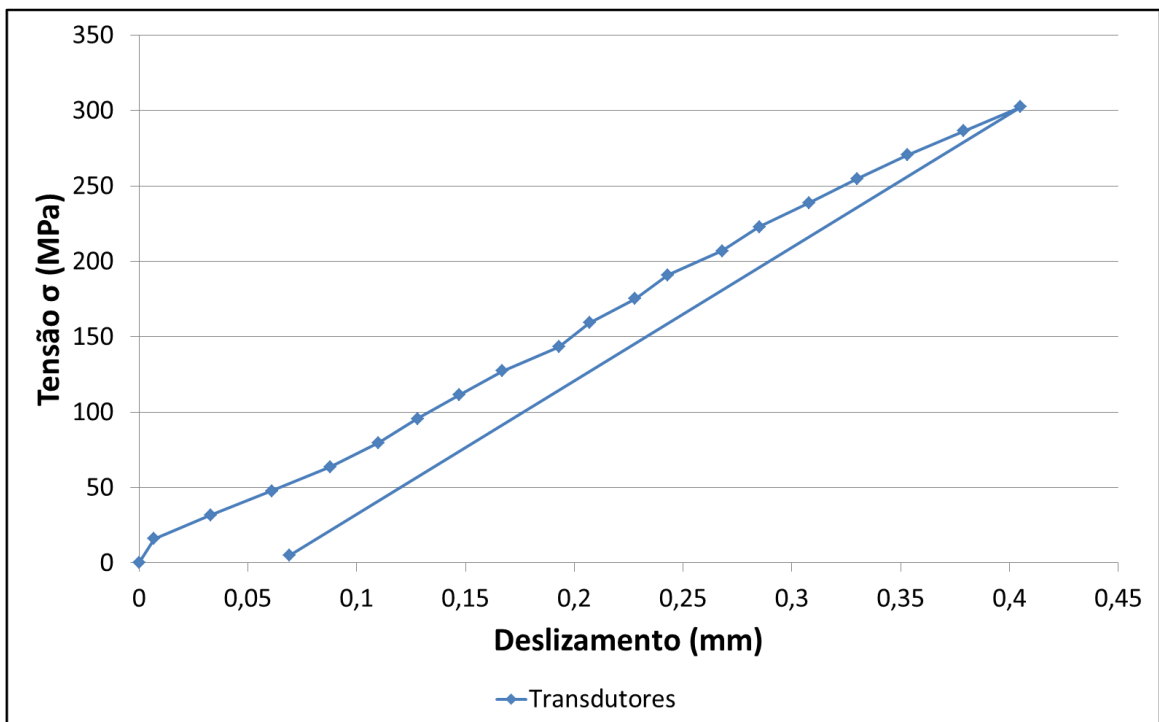
**RC-25mm-9 – Método 3**

## Luva Parafusada 20 mm

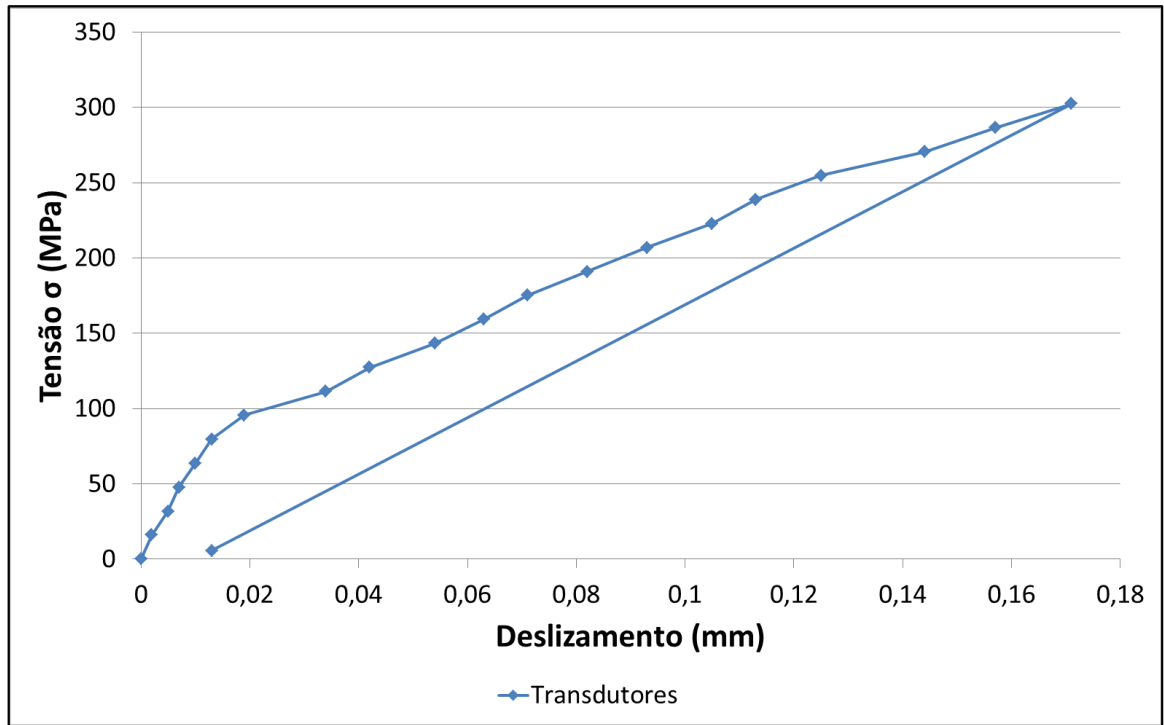
### PAR-20mm-1 – Método 1



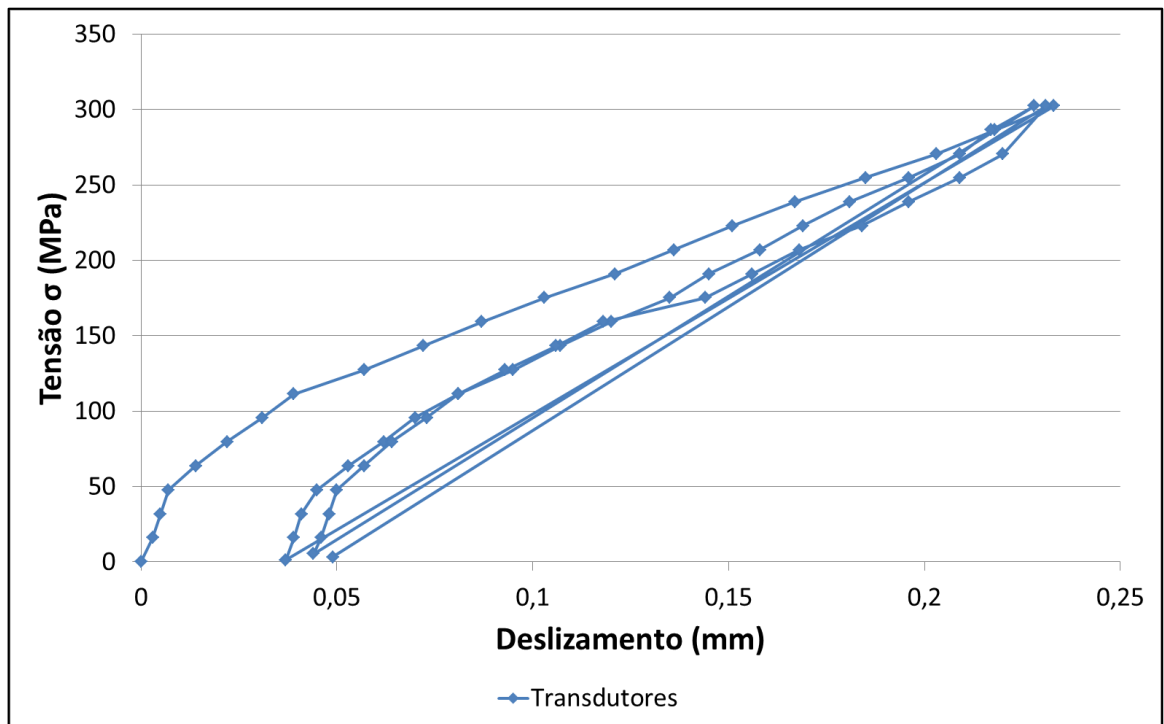
### PAR-20mm-2 – Método 1

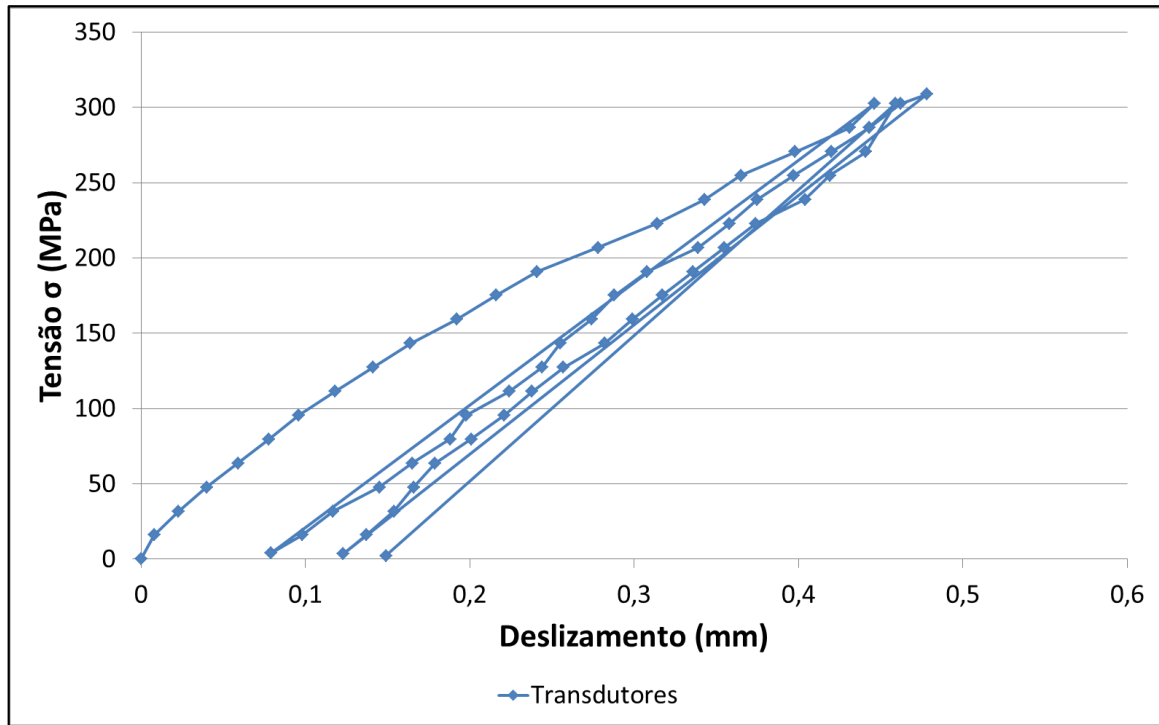
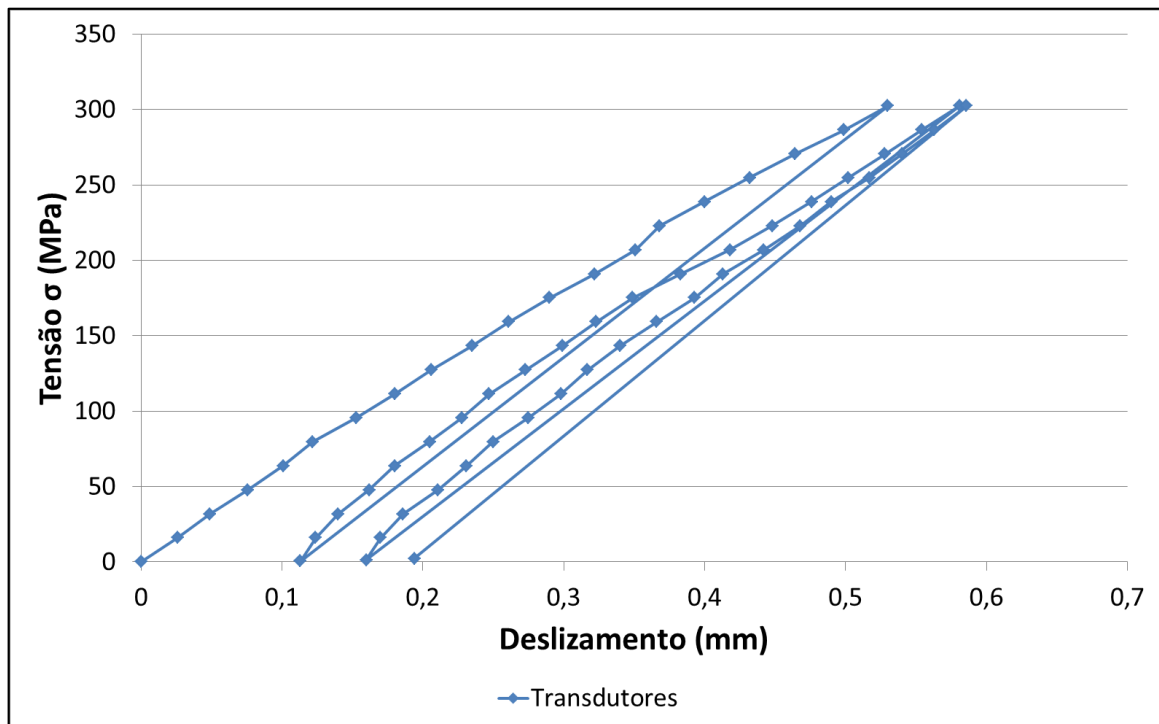


### PAR-20mm-3 – Método 1

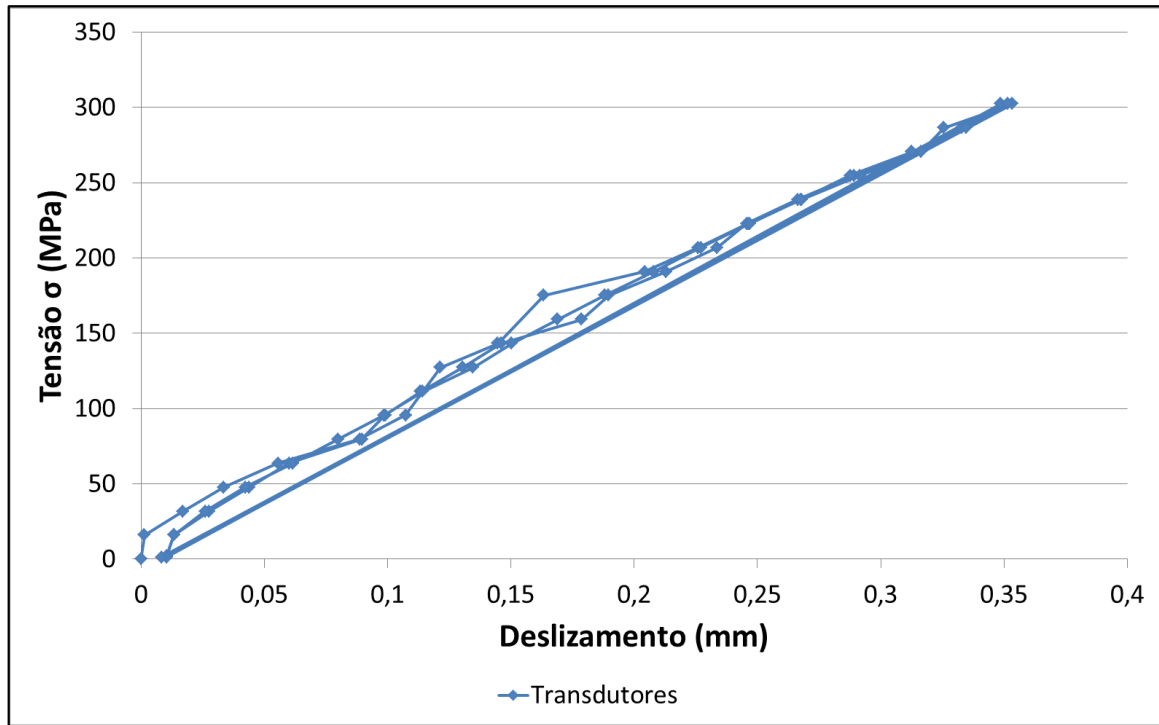
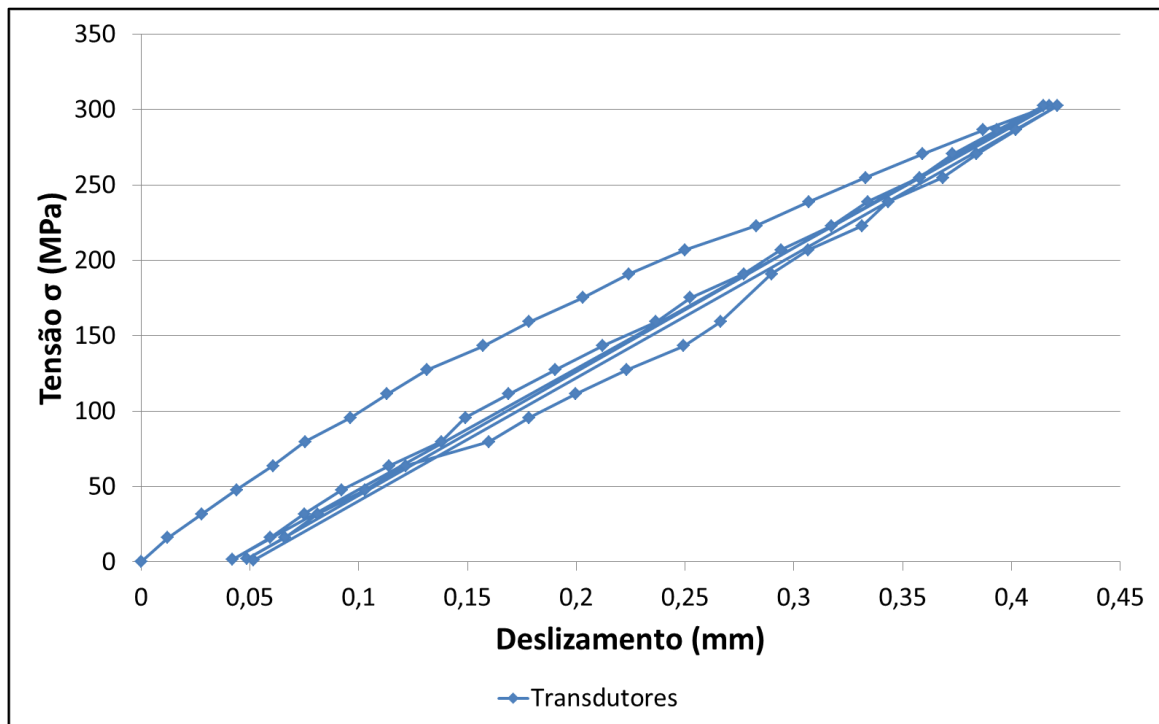


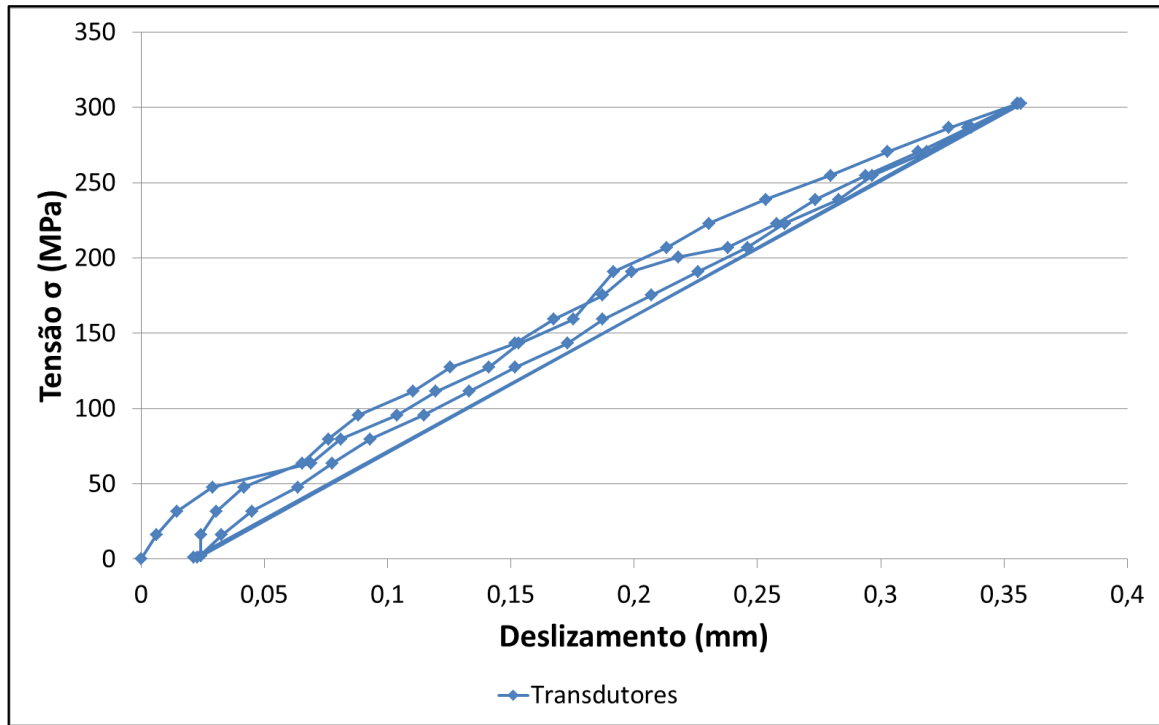
### PAR-20mm-4 – Método 2



**PAR-20mm-5 – Método 2****PAR-20mm-6 – Método 2**

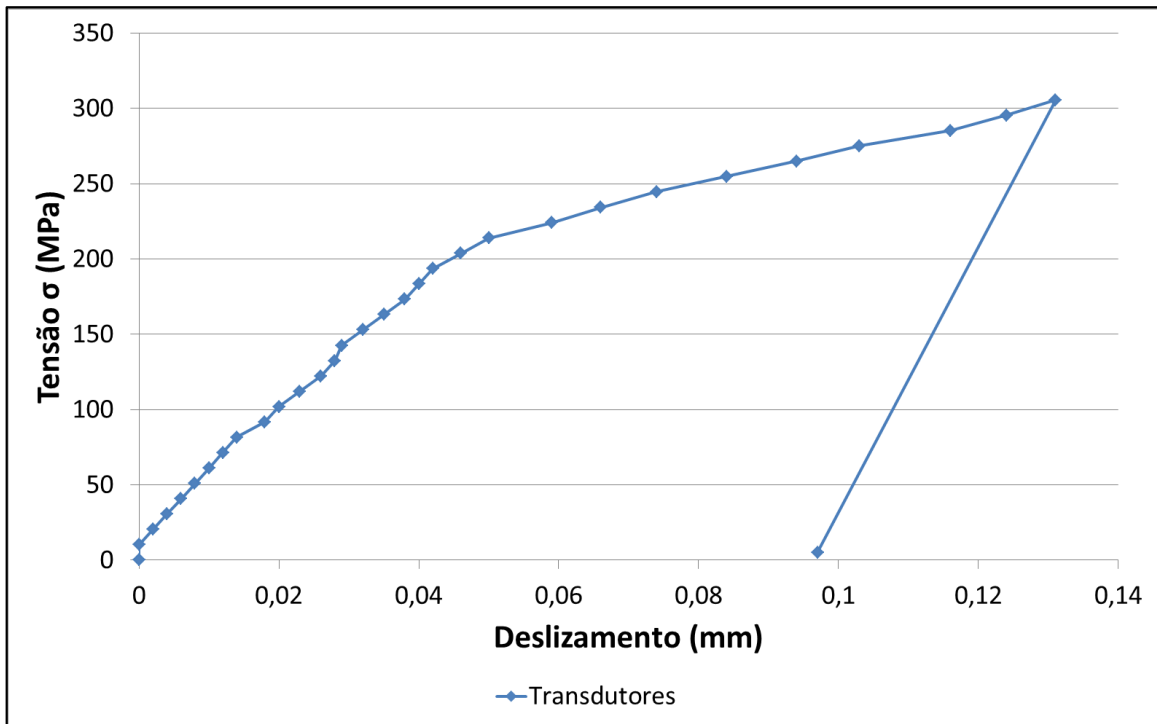


**PAR-20mm-7 – Método 3****PAR-20mm-8 – Método 3**

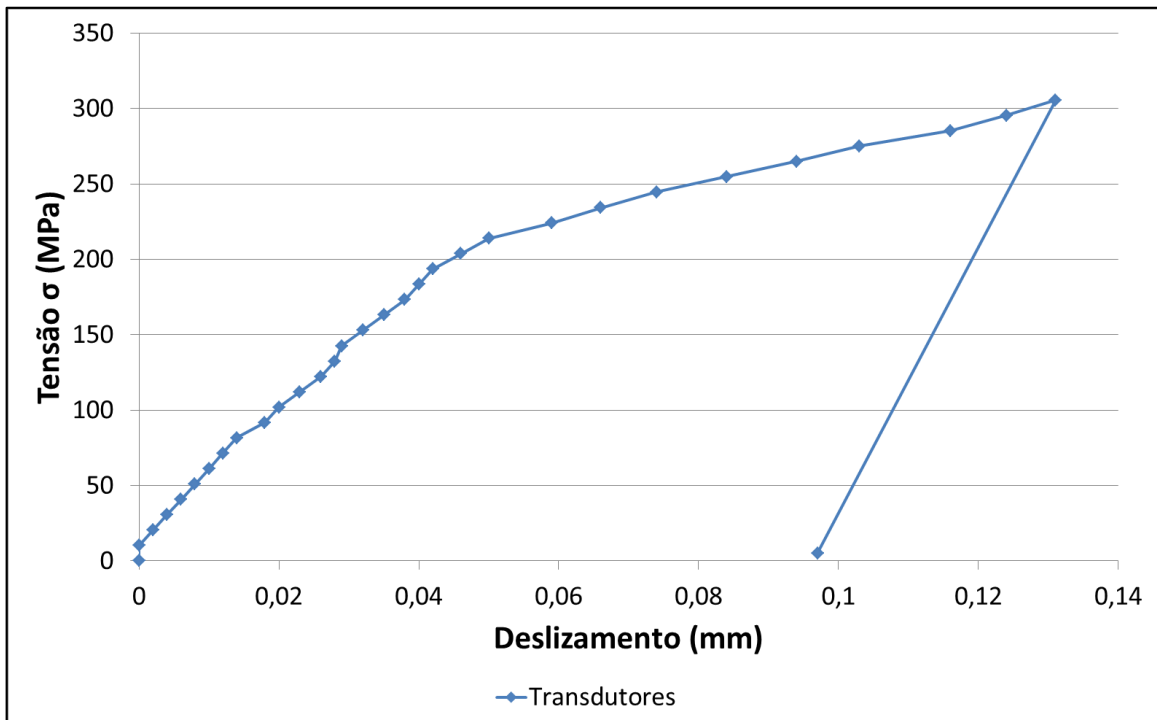
**PAR-20mm-9 – Método 3**

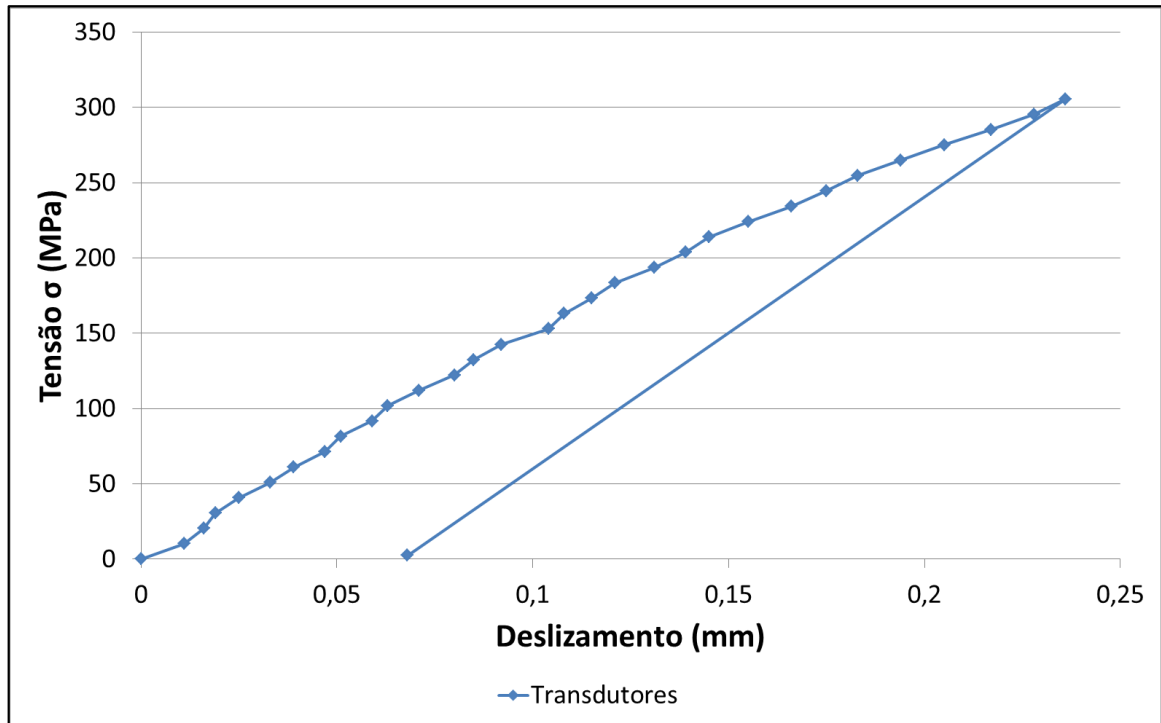
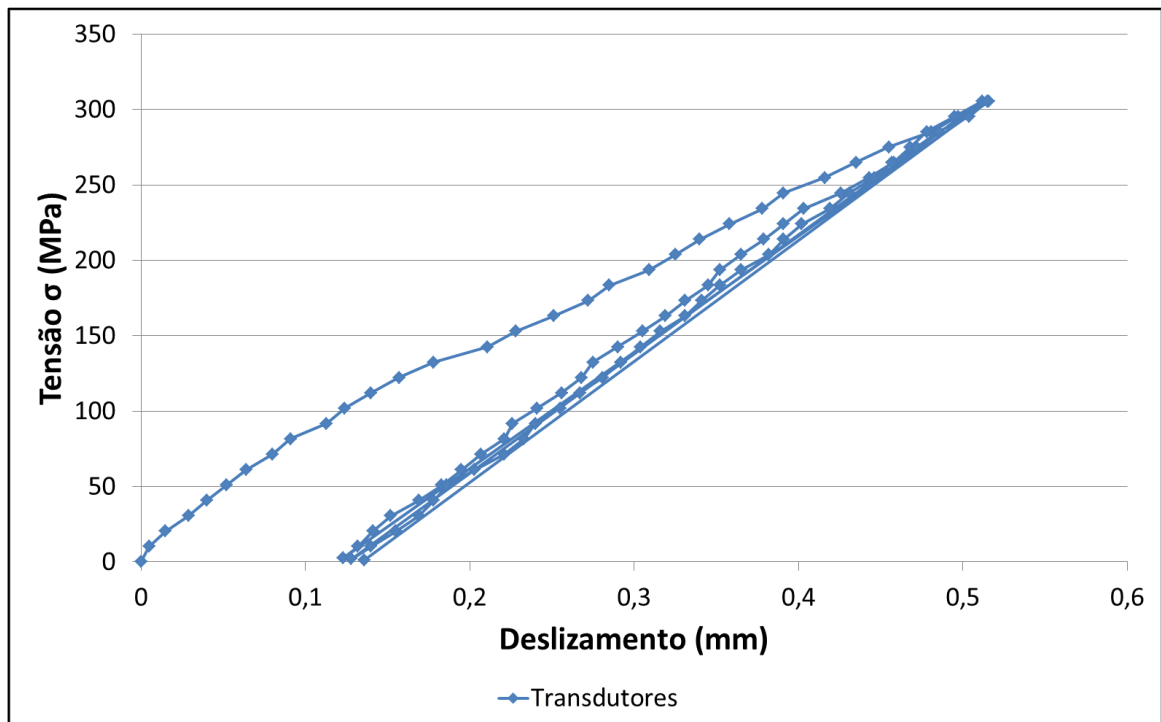
## Luva Parafusada 25 mm

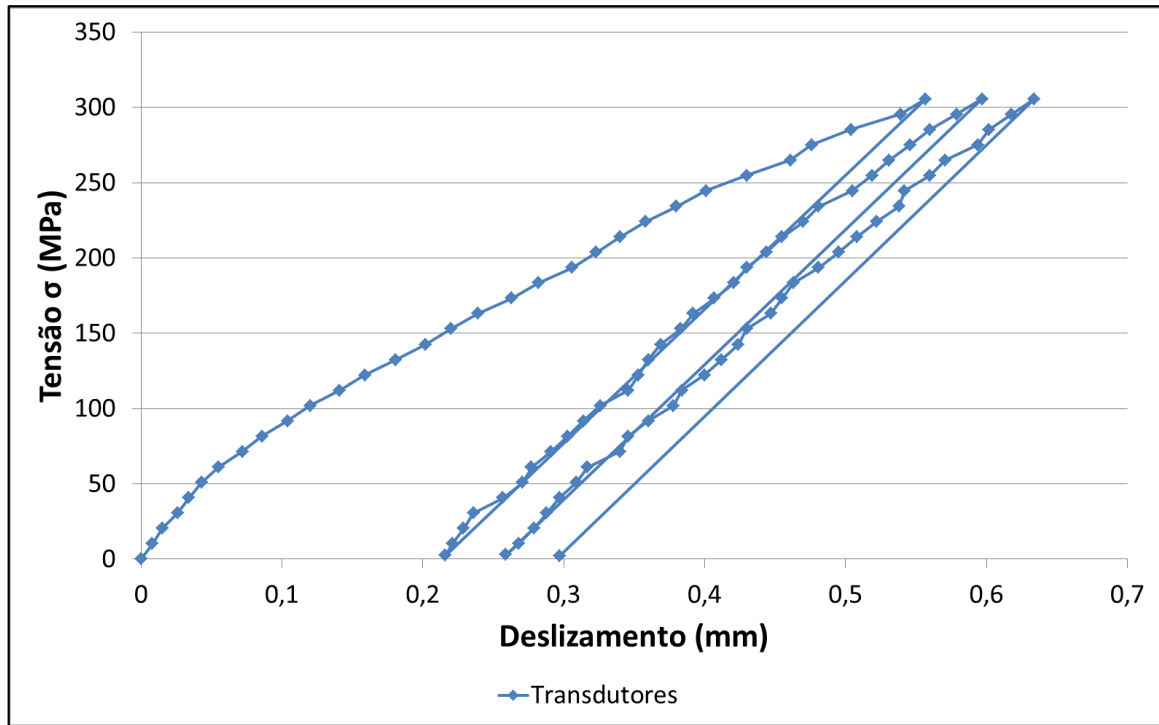
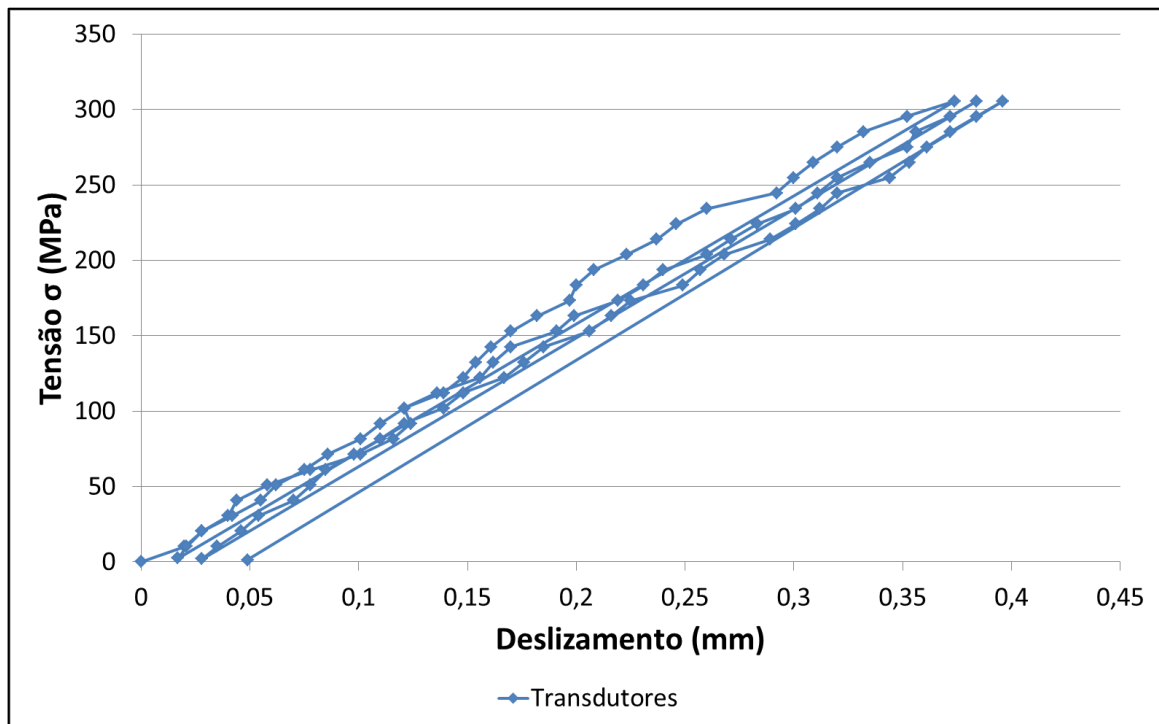
### PAR-25mm-1 – Método 1

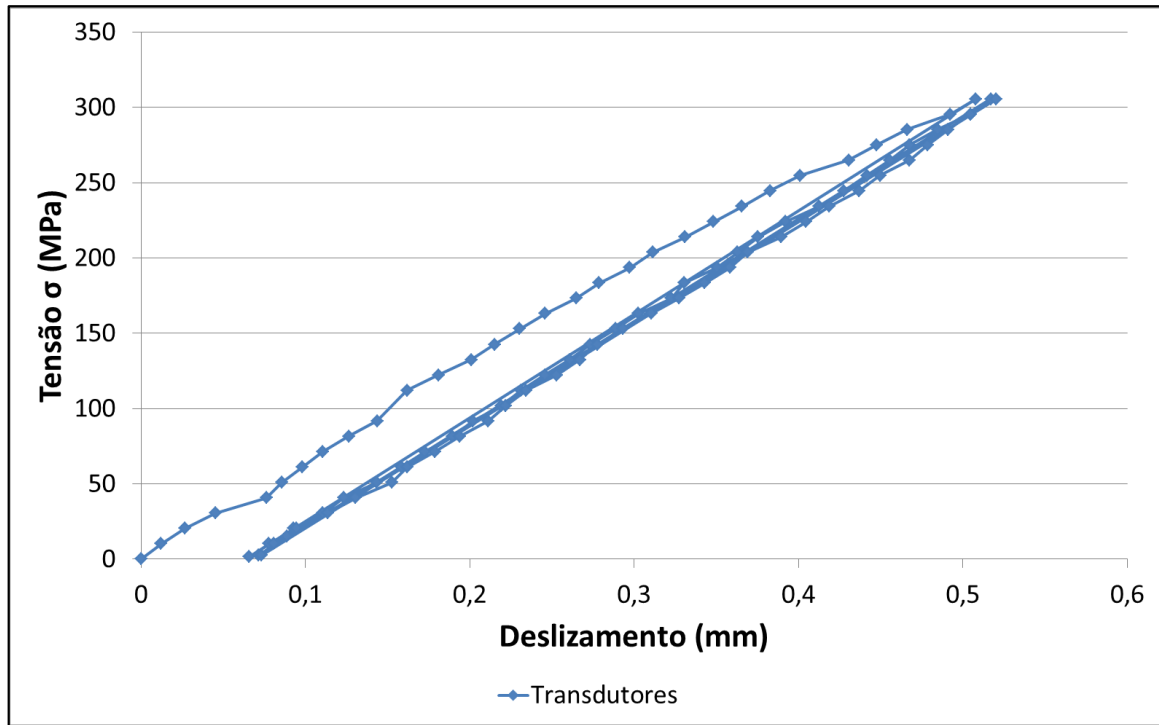
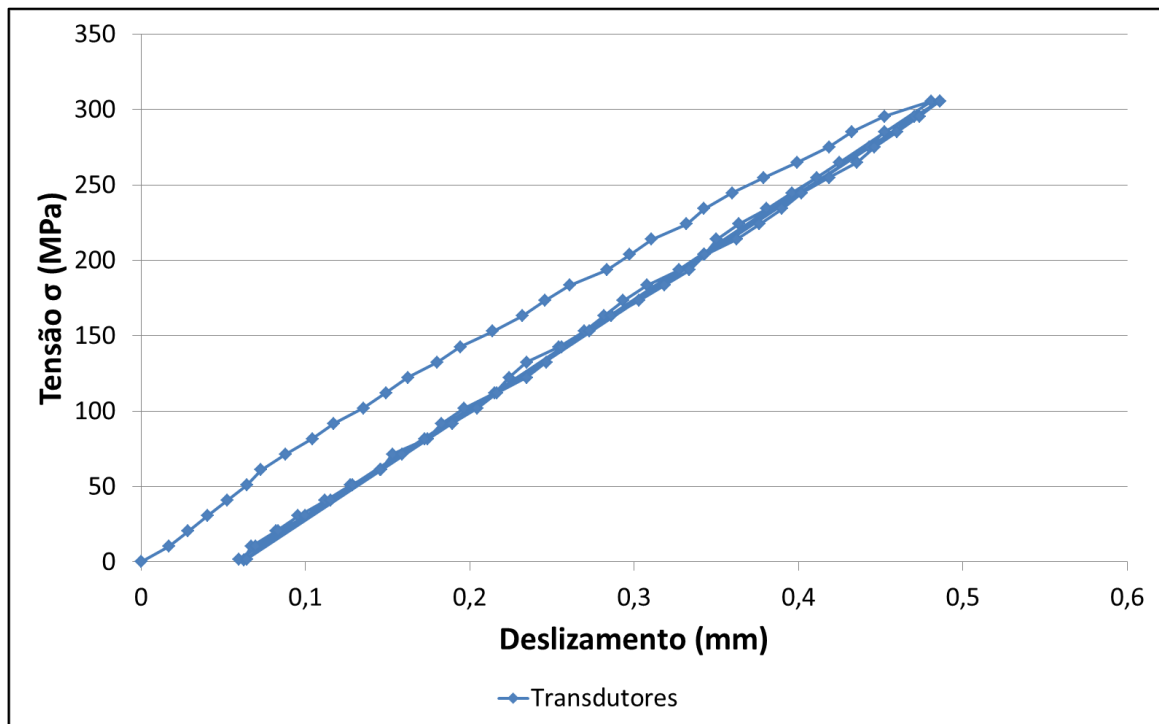


### PAR-25mm-2 – Método 1



**PAR-25mm-3 – Método 1****PAR-25mm-4 – Método 2**

**PAR-25mm-5 – Método 2****PAR-25mm-6 – Método 2**

**PAR-25mm-7 – Método 3****PAR-25mm-8 – Método 3**

**PAR-25mm-9 – Método 3**