VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské metalurgie Školní rok: 1990/91

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Jana L E Ž Í K A

obor strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Rozbor charakteristik mikroohybových zkoušek litinových vzorků.

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou mezních stavů při zatěžování a deformaci šedé litiny, proveďte studie napěťově-deformačního namáhání litinového vzorku b/h v mezích 1 až 5.
2. Po dohodě s vedoucím práce proveďte zkoušku prostým tahem a mikroohybovou zkoušku na vybraných litinových vzorcích a stanovte vztah mezi Rm a Rm_{oh} těchto materiálů.
3. Metodou dle literatury /1/ a /3/ zpracujte početně závislosti tahových a ohybových charakteristik a pokuste se o vzájemné porovnání.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a proveďte možnosti praktického využití mikroohybové zkoušky pro určování kvality tenkých stěn litinových odlitků.

V 20 /91 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

KSM/SM

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné litaratury:

EXNER, J. - ČECH, J.: O některých fyzikálních vlastnostech dynamiky namáhaných automobilových odlitků ze šedé litiny. In: 49. International Foundry Congress. ref.20.Chicago 1982.
VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skušanie kovov. 1. vyd. Praha 1985.
EXNER, J. - MEDUNA, O. - ČECH, J. - BILČÁK, M.: Možnosti hodnocení spolehlivosti litinových odlitků při dynamickém zatěžování. In: XVII. celostátní konference pracovníků automobilového průmyslu. Sborník prací. Dům techniky ČSVTS Ústí n. Labem 1987.
SKRBEK, B.: Nedestruktivní materiálová diagnostika litin. (Disertační práce). VŠST-FS Liberec 1988.
BÁRTA, B.: Šedá litina a její únavové vlastnosti. Slévárenství. XXXII. 1984, č.4, s.124.
HYŠKA, A.: Diplomová práce VŠST-FS Liberec 1990.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant: Ing. Břetislav Skrbek, CSc. (LIAZ Jabl.n.N.)

Zadání diplomové práce: 1. 10. 1990

Termín odevzdání diplomové práce: 3. 5. 1991

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Vedoucí katedry

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Děkan

V Liberci **dne** 15. 3. 1991

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

strojírenská technologie

zaměření

strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské metalurgie

ROZBOR CHARAKTERISTIK MIKROOHYBOVÝCH ZKOUŠEK LITINOVÝCH VZORKŮ

KSM - 363

Jan Ležík

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI
3146076862

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant: Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
(Liaz Jabl.n.N.)

Rozsah práce a příloh:

počet stran:	43
počet tabulek:	6
počet obrázků:	12
počet příloh:	37
počet výkresů:	-

3. 5. 1991

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury.

V Liberci 3. května 1991

Jan Ležík

Seznam zkratek a symbolů

R	- napětí	(MPa)
σ	- napětí	(MPa)
R_{oh}	napětí v ohybu	(MPa)
E	- modul pružnosti	(MPa)
F	- síla	(N)
n	- stupeň paraboly	(1)
ξ	- okamžité prodloužení	(1)
ε	- prodloužení	(1)
I	- modul setrvačnosti	(m^4)
Wo	- průřezový modul	(m^3)
l	- délkový rozměr	(m)
a	- délkový rozměr	(m)
b	- délkový rozměr	(m)
h	- délkový rozměr	(m)
z	- délkový rozměr	(m)
y	- průhyb	(m)
r	- poloměr ohybu	(m)
Mo	- ohybový moment	(N.m)

Obsah

1. Úvod

2. Rešeršní část práce

2.1. Charakteristika šedé litiny

2.2. Současný stav sledování mezních stavů šedé litiny při mechanickém namáhání

2.3. Rozbor mikroohybové zkoušky šedé litiny

2.4. Přehled napěťově - deformačního namáhání šedé litiny

3. Experimentální část práce

3.1. Charakteristika zkoušených litinových materiálů

3.2. Popis mikroohybové zkoušky

3.3. Popis tahové zkoušky

3.4. Postup početního zpracování grafických výsledků

4. Shrnutí výsledků práce

5. Závěr

6. Seznam použité literatury

7. Seznam příloh

1. ÚVOD

V současné době, kdy v naší republice dochází k urychlenému přechodu na tržní hospodářství, je důležitým prvkem zajišťujícím rychlé dosažení úrovně vyspělých zemí správná funkce našeho strojírenského průmyslu, je hlavním prvkem zajišťujícím uplatnění úrovně výroby. Cílem řady opatření zajišťujících zvýšení konstrukční a technologické úrovně výroby našeho automobilového průmyslu jsou vysoce kvalitní výrobky, které by nalezly uplatnění i na nejnáročnějších trzích.

Jak ukazují prognózy technického vývoje do roku 2010, bude i v těchto letech hlavní pohonnou jednotkou vyzrálý pístový spalovací motor. Na tato zařízení budou v důsledku zvýšených požadavků, jakými jsou spolehlivost, životnost, výkon, ekologická a ekonomická hlediska, kladeny zvýšené požadavky. Tyto trendy výrazně ovlivňují svými potřebami výzkum a vývoj slévarenských materiálů a technologie výroby odlitků.

Tyto úkoly také stojí před s.p. LIAZ, který je v současné době hlavním výrobcem vznětových motorů pro pohon nákladních automobilů v tuzemsku, vyvíjí činnost na několika řadách motorů. Na řadě M1 se provádí dílčí inovace, při čemž koncem 90 let by měla být nahrazena moderně koncipovanými motorovými jednotkami řady M2 a M3.

Nové typy motorů jsou realizovány pomocí progresivních konstrukcí a poměrně tenkostěnných odlitků. Při velkoseriové výrobě těchto odlitků je snaha po vytvoření co nejúčelnější lehké konstrukce odlitku vyrobeného ekonomickou technologií z ekonomicky výhodného materiálu. Výroba vysokovýkonných přeplňovaných vznětových motorů s mezichlazením plnícího vzduchu značně zvyšuje nároky na odlitky bloků a hlav válců z hlediska mechanického a tepelného namáhání. Jako důsledek tohoto namáhání vzniká citlivost na výkyvy v materiálové

kvalitě odlitků v hromadné a sériové výrobě.

Intenzifikace a zvyšování kvality výroby přímo závisí na stále dokonalejší činnosti, která musí vycházet z posledních poznatků vědy a techniky. Na této kontrolní činnosti přímo závisí z velké části efekt mající za úkol zvýšit kvalitu výroby.

U materiálové kvality odlitků dochází vlivem výrobních činitelů k výkyvům. Kulminace těchto odchylek se v provozu projeví havarií nebo snížením životnosti. Z toho je patrná nutnost podchycení výkyvu v materiálové kvalitě odlitků.

Z těchto poznatků vyplývá, že v seriové výrobě odlitků exponovaných částí motoru rostou požadavky na mechanické vlastnosti litinových odlitků a jejich exponovaných částí. Tyto požadavky u všech odlitků lze zajistit moderními diagnostickými metodami zavedenými do výrobního procesu seriové výroby. Zavedení těchto progresivních metod je do značné míry limitováno znalostí zkutečných hodnot mezních stavů a napětí, kterými lze litinové odlitky zatěžovat bez vzniku havárie. To umožňuje zkouška mikroohybem.

Dobrá znalost materiálových mezí je důležitá i v předvýrobní fázi. Výkony a funkčnost prototypů u nových vyrobků v plné míře určují jejich další osud. Při vývoji nových motorů vznikají komplikované odlitky, které se musí v plné míře prověřovat, zda splňují požadované materiálové vlastnosti. Kontrolu těchto odlitků do značné míry ulehčuje mikroohybová zkouška litiny. I při současném stavu vyhodnocování se jeví mikroohybová zkouška daleko objektivnější a ryhlejší než klasické zkoušky tahem a ohybem.

Konstruktér je schopen pomocí metod moderní výpočetní techniky určit skutečnou velikost namáhání odlitků. Výkyvy v materiálové kvalitě, ale hlavně neznalost skutečných mezních

stavů litinových materiálů ho nutí nevolit optimální tvar výrobku, ale součást předimenzovat. To má vliv na hmotnost a cenové relace výrobku. Tyto potíže by mohl napomoci odstranit rozbor napěťově-deformačního procesu při mikroohybové zkoušce litin.

Cílem této diplomové práce je pokusit se ověřit aplikaci mikroohybové zkoušky z hlediska napěťově-deformačního procesu, která probíhá při ohybu, a k případným výsledkům provést naznačení cesty pro kvalitativní určení relací mezních hodnot napětí z ohybových charakteristik.

2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

2.1. Charakteristika šedé litiny

Šedá litina má vlastnosti proměnné v širokém rozmezí. V normách ČSN jsou uvedeny jakostní třídy obyčejné šedé litiny s označením 42 2410, 42 2415, 42 2420, 42 2425, kterým přísluší pevnost v tahu 100, 150, 200 a 250 MPa a tvrdost podle Brinella 180, 200, 220 a 240 HB.

Šedá litina je křehký materiál, který nemá prakticky žádnou tažnost. Modul pružnosti se pohybuje v rozmezí od 60 000 do 160 000 MPa; je ovlivňován množstvím grafitu a mění se také s napětím, takže u šedé litiny neplatí Hookův zákon ve tvaru používaném pro oceli. Pevnost v tlaku a v ohybu je u šedé litiny větší než pevnost v tahu a je podstatně méně ovlivňována tvarem a množstvím grafitu. Ve srovnání s pevností v tahu je pevnost v tlaku 3 až 4 krát větší, pevnost v ohybu 1,5 až 2 krát větší. Důležitou vlastností šedé litiny je velmi dobrá schopnost útlumu ve srovnání s ocelí, která značně závisí na tvaru a velikosti grafitu.

Citlivost šedé litiny k účinkům vrubů je vlivem grafitových lupínků značně snížena. Při dynamickém namáhání je proto šedá litina někdy dokonce výhodnějším materiálem než ocel.

2.2. Současný stav sledování mezních stavů šedé litiny při mechanickém namáhání

Na vytváření konkrétních vlastností šedých litin při různých typech únavovvého zatěžování se limitujícím způsobem podílejí tahové složky napětí jako projev specifické aktivní role grafitu, a proto jak vyjádření meze únavy procentním podílem tak i řada kriterií dalších prací se zpravidla opírá o výsledky některých mezních stavů při zkoušce tahem. Základní podmínkou úspěšnosti řešení je však překonání tradičního přístupu při stanovení statických vlastností šedé litiny v tahu a při hodnocení deformační tahové charakteristiky "napětí - prodloužení". Drápal se pokusil o grafické řešení náhradou skutečné křivky "napětí - prodloužení" obecnými parabolami s různými stupni **n** s tím , že hodnotu modulu pružnosti v dané oblasti platnosti určitého stupně **n** považuje za konstantu.

Náhr Náhradní matematický model pro zpracování naměřených hodnot deformační charakteristiky šedé litiny má obecný tvar:

$$\sigma = E \cdot \xi^{n} \qquad (2.1.)$$

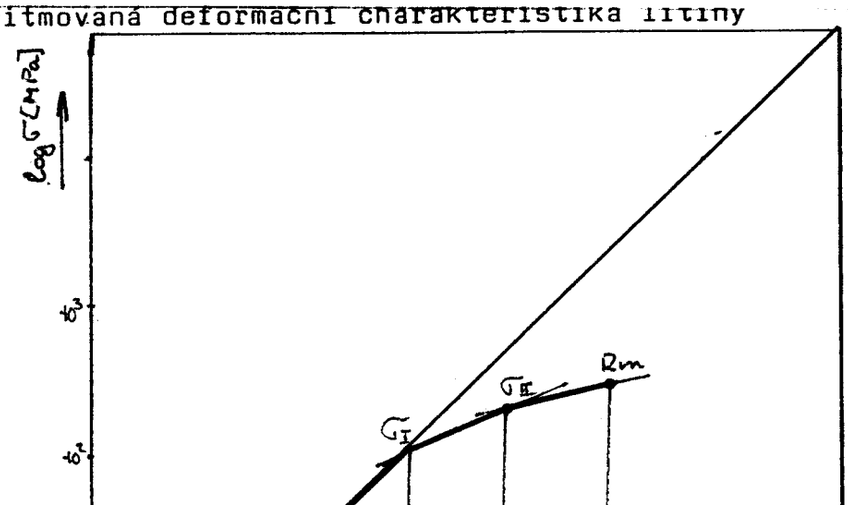
po převodu křivky na logaritmický tvar

$$\log \sigma = \log E + n \cdot \log \xi \qquad (2.2)$$

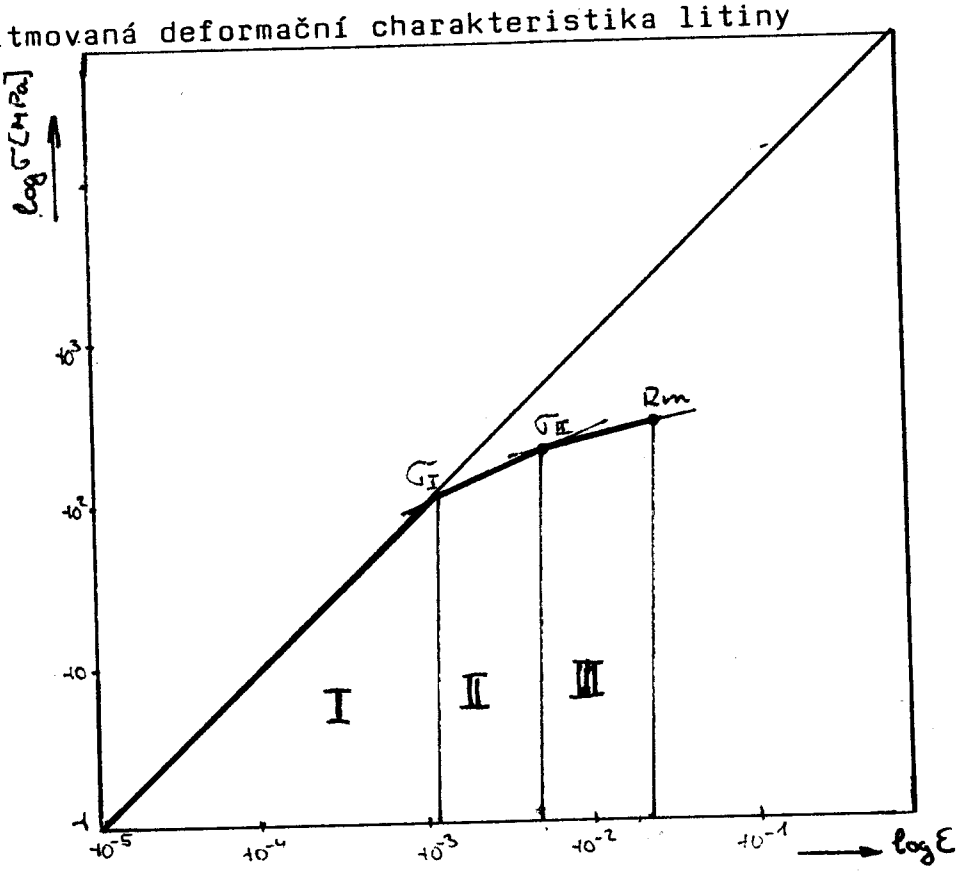
kde : **n** je stupeň paraboly
E je modul pružnosti
σ je napětí

Po vymezení křivky v logaritmických souřadnicích $\log \sigma$ - $\log \xi$ dojde k objevení tří oblastí. Tyto oblasti jsou charakteristiské různým způsobem vnějšího projevu deformace.

logaritmovaná deformační charakteristika litiny



logaritmovaná deformační charakteristika litiny



Obr. č. 1: Logaritmovaná deformační charakteristika litiny

První oblast I označuje jako oblast mikroplastických deformací, t.j. deformací probíhajících pouze místně v mikroobjemech na rozhraní útvaru graftu, aniž by se navenek projevovaly. Exponent n nabývá zpravidla hodnot od 0,85 do 1.

V druhé II a třetí III oblasti dochází již k pružněplastickým deformacím, avšak s významným rozdílem v časové závislosti růstu deformace vlivem tečení -

- v druhé oblasti s exponentem n v mezích 0,40 až 0,7 je rychlost růstu deformace vlivem tečení málo významná

- v třetí oblasti s exponentem n v mezích 0,18 až 0,40 je již rychlost růstu deformace vlivem tečení velmi výrazná.

Průsečík přímek charakterizuje dvě mezní hodnoty

σ_I - mez mikroplastických deformací

σ_{II} - mez pružně plastických deformací

Při podrobném rozboru dějů vznikajících při deformačním procesu v oblasti mikroplastických deformací vyplývá z práce (1), že pod σ_I musí existovat mezní stav označovaný jako mez převážně pružných deformací R_E . Mez převážně pružných deformací je mezní napětí , při kterém bude velikost nepružných deformacízanedbatelná. Tato mez charakterizuje hodnotu napětí, při kterém u litin dojde ke vzniku mikrotrhlin v základní kovové matrici.

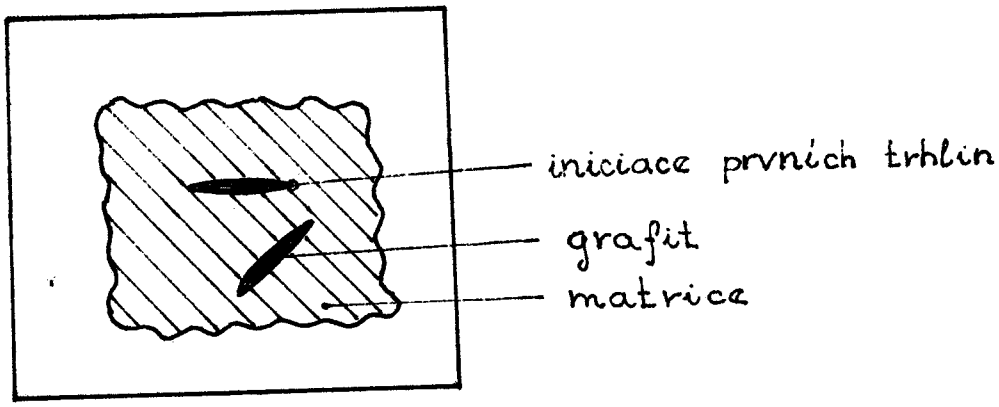
Exner v práci (1) popisuje určování hodnoty R_E podle průběhu první derivace panenské deformační křivky. Důvodem, proč Exner pracoval s prvotně zatěžovaným materiálem je, že tvar deformační křivky předzatíženého tělesa a tělesa prvotně zatěžovaného je u litin odlišný. Příčinou je nerovnoměrný tvar grafitových lupínků, který se projeví narušením průřezu kovové matrice s následnou koncntrací napětí. Tato koncentrace způsobí, že v mikroobjemech dojde přes nízké zatížení k plastické deformaci. Z toho vyplývá, že litiny se neřídí Hookovým zákonem.

Exner provedl derivaci $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ tahové deformační křivky (tato derivace se shoduje s modulem pružnosti E). Analýzou této derivace stanovil čtyři mezní stavy namáhání.

1. oblast s převážně pružnými deformacemi	$0 - R_E$
2. oblast s pružně - mikroplastickými deformacemi	$R_E - R_I$
3. oblast s pružně - plastickými deformacemi	$R_I - R_{II}$
4. oblast s převážně plastickými deformacemi	$R_{II} - Rm$

Z průběhu deformační charatkeristiky lze dobře popsat mechanismus deformačních procesů při postupném nárustu napětí.

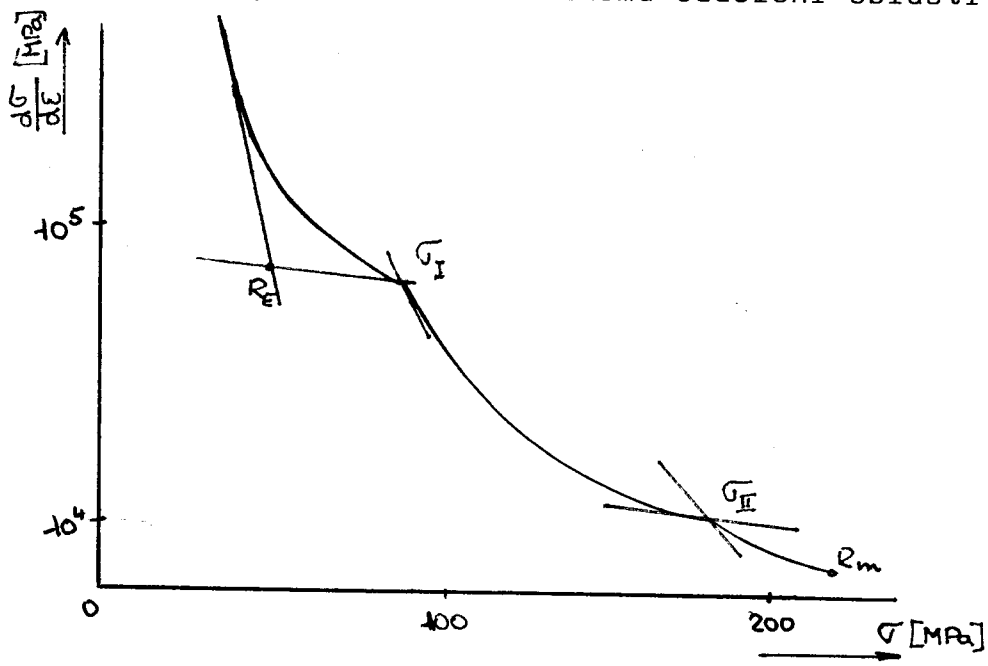
Na počátku zatěžování, t.j. v oblasti převážně pružných deformací, jsou hodnoty $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ velmi vysoké, ale nedosahují úrovně hodnot u ocelí. To je způsobeno tím, že v těchto oblastech se pružně deformuje pouze kovová matrice vlivem vnějšího zatížení a působením nerovnoměrných grafitových lupínků. Při přechodu meze R_E , která se na derivované křivce projeví jako zlom, dochází v mikroobjemech na rozhraní grafit - matrice k iniciaci prvních trhlin, jak je uvedeno na obr. č. 2.



Obr. č. 2.:Schéma iniciace trhlin v šedé litině

Při dalším zvyšování napětí počet mikrotrhlin neustále narůstá až do napětí na mezi mikroplastických deformací R_I , což se projeví zlomem na křivce. Při zvyšování napětí se úměrně rozšiřuje velikost plasticky deformovaných oblastí dalším rozvojem poruch. Po přechodu meze pružně - plastických deformací, což se projeví dalším zlomem na křivce, dochází k rychlému rozvoji poruch až do destrukce označené jako mez pevnosti R_m.

Zajímavým jevem je splývání oblastí odlišujících se mechanismem deformace v závislosti na typu litiny. Jedná se o děj, kde se slučují oblasti, ve kterých trhliny vznikají a rychle se šíří. Tento děj se projevuje hlavně u nízkopevnostních litin (feritická matrice). Naopak u litin středních a vyšších pevnostních hladin (feriticko-perlitická a perlitická matrice)dochází k zřetelnému oddělení oblastí.



Obr. č. 3.: Derivovaná deformační charakteristika litiny (Ex)

Ze závěru práce Exnera vyplývá, že pro zhodnocení statického zatěžování litiny by měla být používána mez mikroplastických deformací σ_I jako analogie kluzu R_p pro ocel. Důvodem je, že má fyzikální význam vycházející z podstaty změny deformací. R_p 0,2 a R_p 0,1 jsou hodnotami určenými smluvně (R_p 0,2 určená graficky může podle druhu litiny zasahovat až do oblasti plastické deformace) a jejich použití je značně orientační.

2.3. Rozbor mikroohybové zkoušky šedé litiny

Moderní průmysl si vyžaduje stále víc litinových odlitků o tloušťce stěn 5 až 10 mm.

Lité zkušební tyče pro zkoušku ohybem svými rozměry dle ČSN 42 0361 velmi často přesahují tloušťky stěn hodnocených odlitků.

Byly uskutečněné pokusy vyhodnocovat mechanické vlastnosti litiny v tenkých stěnách s upraveným rozměry tyčí pro tahové zkoušky, ale pevnostní vlastnosti vykazovaly velký rozptyl. Proto další pokusy byly zaměřené na zkoušky ohybem s malorozměrnými zkušebními tyčemi. Cílem ohybových zkoušek uskutečněných na tenkých zkušebních tělískách bylo stanovit možnost jejich aplikace na určení kvalitativních ukazatelů tenkostěnných odlitků. Tahové zkoušky jsou pro tento účel nevhodné.

Průhyb tyče kruhového, resp. čtvercového průřezu je daný vztahem

$$y = \frac{Fm \cdot l^3}{48EI} \qquad (2.3.)$$

kde je y - průhyb (mm)

Fm - max. zatížení (N)

l - vzdálenost mezi podporami (mm)

I - moment setrvačnosti (mm^4)

E - modul pružnosti ($N\ mm^{-2}$)

pro obdelníkové průřezy

$$I = \frac{ab^3}{12} \qquad (2.4.)$$

V případě mikroohybové zkoušce vyvinuté v OUMM LIAZ Skrbkem se zkouška provádí na zkušebním hranolku.

Zkouška se provádí na speciálním přípravku. Ten se skládá z dvou podpor, ohybníku, dvojice kalených vložek, tenzometrické soupravy určené k snímání síly a průhybu zařízení je doplněné vyhodnocovacím zařízením a souřadnicovým zapisovačem.

Na ose X se zaznamenává průhyb a na ose y se zanamenává působící síla. Tvar křivky závisí na typu a vlastnostech litiny. Zkouška se provádí až do destrukce vzorku (Rm_{OH}- mez pevnosti v ohybu). Vyhodnocování tvaru křivek se provádí porovnávací metodou s křivkami získanými zkoušením vzorků známých vlastností.

Mechanické hodnoty, které lze ze zkoušky určit, jsou .

Mez pevnosti v ohybu

$$Rm_{oh} = \frac{Mo\ max}{Wo} = \frac{\frac{1}{4} F.l}{\frac{1}{6} b.h^2} \qquad (2.5.)$$

kde : F - působící síla
l - vzdálenost podpor
b - šířka vzorku
h - výška vzorku

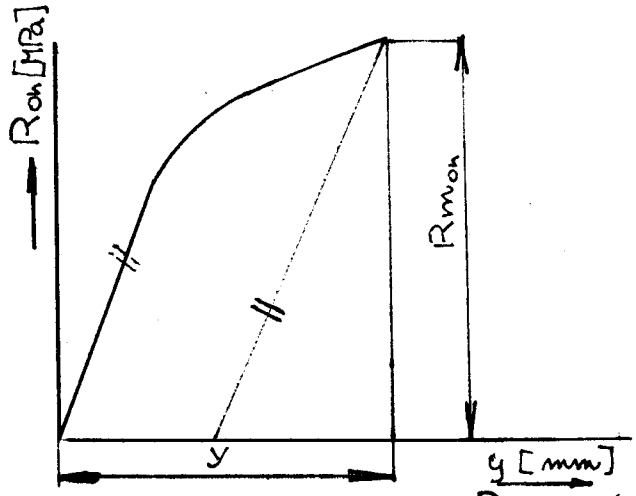
Absolutní průhyb y (naměřený přímo při zkoušce)

Podíl plastického a lineárního průhybu:

$$y_P = \frac{P}{y-P} \qquad (2.6.)$$

P - plastický průhyb
y - absolutní průhyb

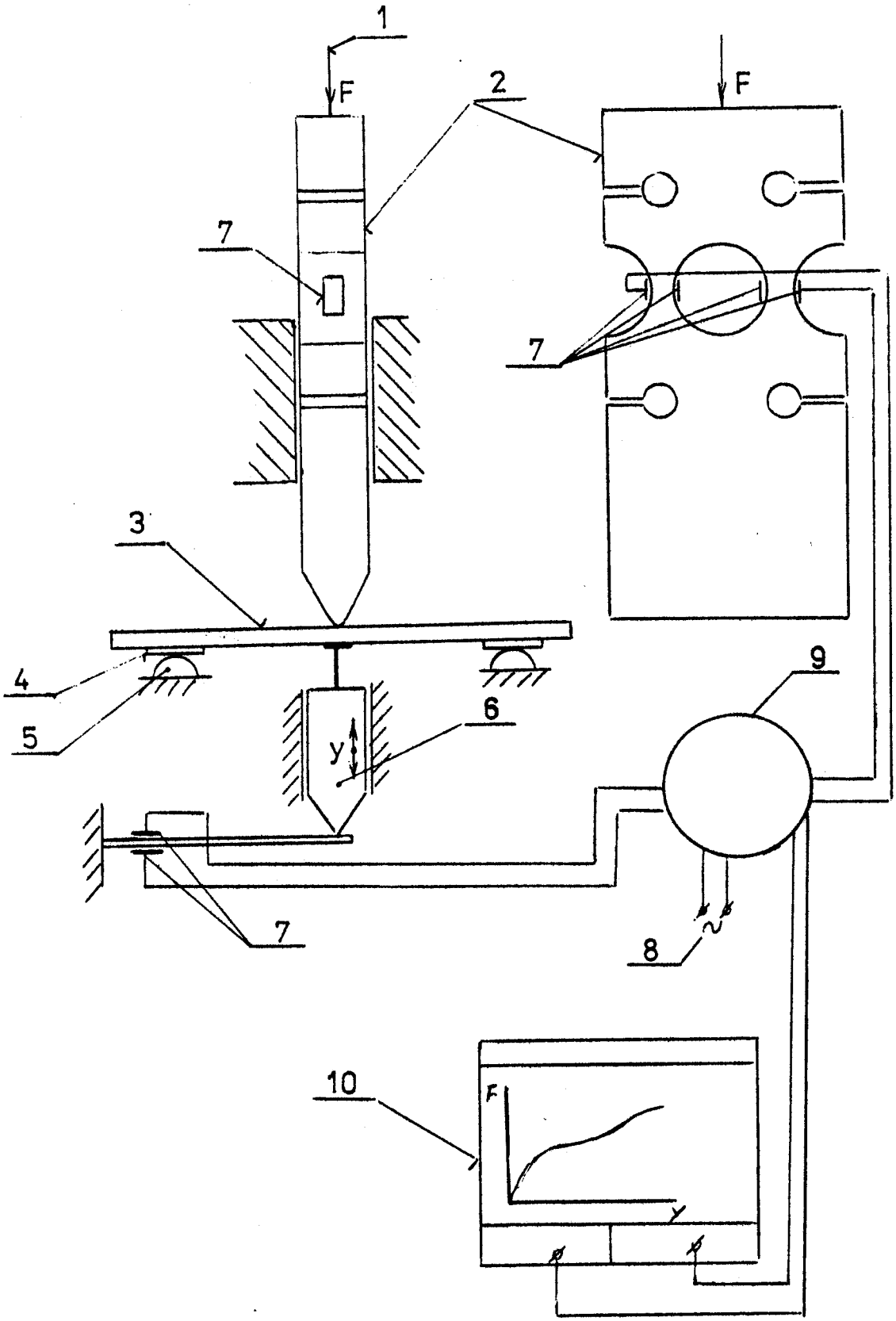
y_p je závislý na absolutním průhybu, průřezu zkušební tyče a charakterizuje plasticitu materiálu.



Obr.č.4.: Ohybová křivka R_{oh} = f(y) a měřené veličiny

Legenda k obr. č. 5.:

1) působící síla
2) ohybník
3) zkušební těleso
4) kalené podložky
5) podpory
6) průhybový čípek
7) tenzometry
8) zdroj napětí
9) vyhodnocovací můstek a zesilovač
10) souřadnicový zapisovač



Obr. č. 5: Blokové schéma přípravku pro mikroohybovou zkoušku

2.4. Přehled napěťově deformačního namáhání šedé litiny

Vzhledem k tomu, že ve struktuře litiny je vždy příto-nem grafit, který je měkký a drobivý, tak při namáhání tahem napětí nepřenáší. Při namáhání tlakem, kdy se grafit chová jako uzavřená kapalina namáhání částečně přenáší. Důsledkem této vlastnosti litiny je odlišnost v pevnostních relacích litinových materiálů tah - tlak. U ocelových materiálů je diagram zkoušky tahem a tlakem téměř totožný. U litin se výrazně liší jak tvarem, tak velikostí.

Při provádění ohybu (probíhajícího také u mikroohybové zkoušky) obdelníkového průřezu dochází ke kombinovanému namáhání tah - tlak. Na odlehlé části průřezu od neutrální osy dochází k namáhání tahem, v přilehlé části průřezu dochází k tlakovému namáhání. Pro napětí vzniklé v části průřezu odlehlého od neutrální osy z platí :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (2.7.)$$

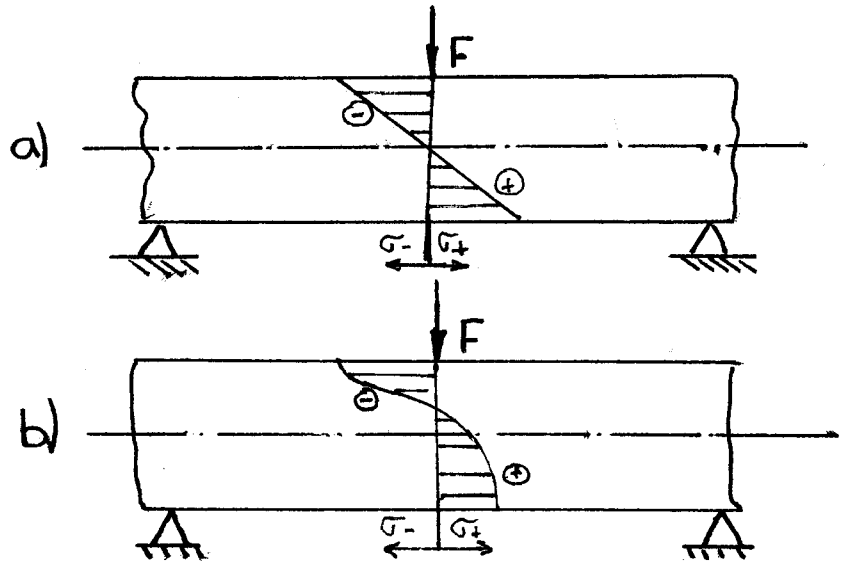
kde

$$\varepsilon = -\frac{z}{r} \qquad (2.8.)$$

z - vzdálenost od neutrální osy
r - poloměr ohybu

Vlivem toho, že se litiny neřídí Hookovým zákonem, a že modul pružnosti pro tahovou a tlakovou oblast je odlišný, bude průběh napětí ve vzdálenosti od neutrální osy nelineární. Vzhledem k tomu, že bude na větší části průřezu tahové napětí, a že litina je daleko citlivější na tahové napětí, je možno

vyslovit předpoklad, že teorie mikroplastických deformací dle práce Exnera by se mohla projevit i u mikroohybové zkoušky. Analogie spočívá v nahrazení závislosti $\sigma = f(\varepsilon)$ závislostí $R_{oh} = f(y)$, kde = R_{oh} je ohybové napětí a y je průhyb.



Obr. č. 6.: Rozložení napětí při ohybu: a) oceli
b) litiny

Získání hodnot reálných vlastností šedé litiny má především význam u tenkostěnných odlitků pod 10 mm, u kterých se velmi významně projevují složitá dynamická namáhání.

Netradiční metodika vyhodnocení tahové zkoušky dovoluje mimo meze pevnosti R_m stanovit ještě další hodnoty napětí.

1. mez nestabilního šíření makroskopických deformací σ_{II}, po jeho překročení dochází ke spontánnímu netrvalému porušení soudružnosti s přechodem do lomu.
2. mez mikroplastických deformací σ_I, která svou fyzikální podstatou je analogická mezi kluzu u ocelí.
3. mez pružných deformací R_E, která ohraničuje tu počáteční oblast takové charakteristiky litiny, kudy dochází k převážně pružným deformacím základní kovové hmoty ještě bez

výraznějšího ovlivnění základní kovové hmoty nukleací a vznikem prvních mikrotrhlin, tj. svou fyzikální podstatou je analogická mezi pružnosti či mezi úměrnosti u oceli.

Exner ve své práci určil tyto relace mezních stavů vůči mezi pevnosti.

pro šedé litiny nelegované

$$R_E = (0{,}28 \div 0{,}36) \cdot Rm \qquad (2.9)$$
$$\sigma_I = (0{,}39 \div 0{,}46) \cdot Rm \qquad (2.10)$$
$$\sigma_{II} = (0{,}7 \div 0{,}85) \cdot Rm \qquad (2.11.)$$

pro šedé litiny nízkolegované

$$R_E = (0{,}32 \div 0{,}36) \cdot Rm \qquad (2.12.)$$
$$\sigma_I = (0{,}48 \div 0{,}52) \cdot Rm \qquad (2.13.)$$
$$\sigma_{II} = (0{,}84 \div 0{,}88) \cdot Rm \qquad (2.14.)$$

Závěrem této kapitoly je třeba dodat, že všechny poznatky uvedené v rešeršní části byly využity při řešení vlastních experimentů.

3. Experimentální část práce

3.1 Charakteristika zkoušených litinových materiálů

Hlavní část diplomové práce byla zaměřena na provedení mikroohybové zkoušky a zkoušky prostým tahem litinových odlitků s lupínkovým grafitem.

K tomuto účelu byly použity materiály tří druhů litiny vyrobéné v s.p. Liaz - slévárna Liberec. Rozměry vzorků byly voleny tak, aby splňovaly požadovaný poměr mezi šířkou a výškou.

Rozměry byly voleny s ohledem na možnost jejich upnutí do zkušebního zařízení (viz.obr.č. 5) 3x3x45; 3x6x45; 3x7,5x45; 5x5x45; s drsností povrchu Ra=1,6 μm.Pro každý z těchto rozměrů byly od každého použitého materiálu voleny minimálně tři zkušební tělíska, aby bylo možno provést statistické vyhodnocení sledovaných vlastností. Chemické ložení uvedených materiálů je patrno z tabulky 1.

Informativně byla sledována i struktura jednotlivých vzorků litin. K tomu byla použita světelná mikroskopie - mikroskop NEOPHOT 21, výrobek Carl Zeiss Jena (SRN). Vzorky byly připraveny běžným metalografickým způsobem, leštění bylo provedeno na odstupňované sadě leštících kotoučů a pro zvýraznění struktury bylo provedeno leptání v tří procentním roztoku Nitalu. Metalografické hodnocení vzorků použitých materiálů šedých litin bylo provedeno dle ČSN 42 0461, kdy při 100 násobném zvětšení byl sledován tvar, velikost a rozložení grafitu a při zvětšení 500 násobném byly charakterizovány základní kovové hmoty použitých šedých litin. Dispersita případného perlitu byla sledována při zvětšení 1000 násobném.

Hodnocení grafitu u materiálu č. 1:
- grafit ve tvaru lupínků
- mezidendriticky usměrněný až neusměrněný
- velikost grafitu 30 - 60 um

To odpovídá značení dle ČSN I, D-E, 6

Hodnocení grafitu u materiálu č. 2:
- převládající tvar grafitu lupínkový, v malém množství ve tvaru kuliček
- mezidendriticky neusměrněný až usměrněný
- velikost grafitu 10 - 60 um

To odpovídá značení dle ČSN I,D-E,6-7

Hodnocení grafitu u mateeriálu č. 3:
- převládající tvar grafitu lupínkový, s malým množstvím nedokonale zrnitého grafitu, které je však nepatrné
- smíšené rozložení lupínkového grafitu
- velikost grafitu 15 - 60 um

To odpovídá značení dle ČSN I, C, 6-8

Z hodnocení základní kovové hmoty všech tří druhů litin je patrné, že základní kovová hmota je perlitická, což bylo zjištěno u všech sledovaných vzorků daných litin.
- základní hmota lamelární perlit, což odpovídá značení dle ČSN P1
- obsah perlitu v matrici dle ČSN P-FeO; obsah perlitu podle normy je 98%
- dispersita lamelárního perlitu Pd 1-1,4; tomu odpovídá hodnota 0,8-1,6 um
- obsah eutektického cementitu odpovídá hodnotě C2; což činí 2%

- obsah cementitu je sledován při 100 násobném zvýšení; velikost útvaru cementitu je do 2000 um; značení Cv 2000

Takto popsaná mikrostruktura přísluší všem třem druhům litiny. Odlišnosti jsou ve velikosti a rozložení fosfidického eutektika, které se určuje při zvětšení 500 násobném.

Hodnocení vzorků typu litiny 1 a 3:
- typ pseudobinární, odpovídá značení F1
- rozložení fosfidického eutektika je v jednotlivých útvarech, odpovídá značení Fr1
- velikost síťoví fosfidického eutektika Fd 400, což je 250-500 μm
- velikost útvarů fosfidického eutektika Fv 2000, což je do 2000 μm^2

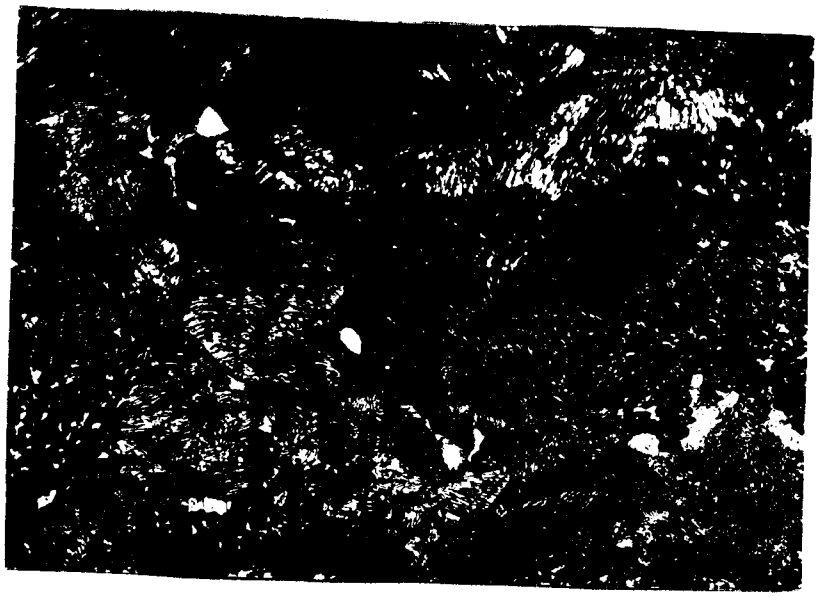
Hodnocení vzorků typu litiny 2:
- typ ternární jemnozrná F2
- rozložení v nesouvislém síťoví, značení Fr1
- velikost síťoví Fd 650, což je 500-700 μm
- velikost útvarů fosfidického eutektika Fv 6000 μm

Tvar, velikost, rozložení grafitu i charakter základní kovové hmoty sledovaných litin je patrný z obr. 3.1. až 3.6.

Neleptáno

100 x

Obr.3.1.: Tvar, velikost a rozložení grafitu (materiál č.1)



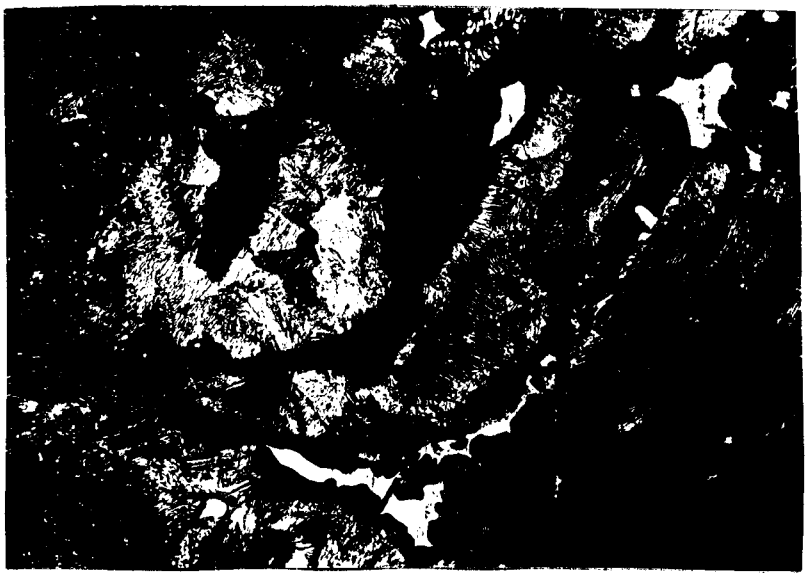
Nital

500 x

Obr.3.2.: Struktura litiny s lupínkovým grafitem (materiál č.1)

Neleptáno 100 x

Obr. 3.3.: Tvar, velikost a rozložení grafitu (materiál č. 2)



Nital 500 x

Obr. 3.4.: Struktura litiny s lupínkovým grafitem (materiál č. 2)

Neleptáno 100 x

Obr. 3.5.: Tvar, velikost a rozložení grafitu (materiál č. 3)

Nital 500 x

Obr. 3.6.: Struktura litiny s lupínkovým grafitem (materiál č. 3)

3.2. Popis mikroohybové zkoušky

Zkoušení byly podrobeny tři různé druhy materiálů. Od každého materiálu byly měřeny tři vzorky ke každému z pěti různých poměrů stran.

Ke zkoušce byl použit speciální přípravek vyvinutý v s.p. Liaz Skrbkem pro zkoužku mikroohybem, úmístěný na stole zdroje plynulé ohýbací síly - universálním trhacím stroji EU - 40. Za účelem záznamu průběhu sledovaných parametrů byl na přípravek napojen souřadnicový plošný zapisovač XY 4106. Jako záznamový prostředek byl použit milimetrový papír. Měřící konstanty byly voleny pro osu X 20 a 50 mV/cm a pro osu Y 50, 100, 200 mV/cm.

Vzhledem k tomu, že zkoušená tělíska byla poměrně malých rozměrů, docházelo při počátku zatěžovacího cyklu k nepřesnostem, jelikož zkoušená tělíska teprve při jistém zatížení plně dosedla na kalené destičky, zatímco průhybový čípek již zaznamenal pohyb. Ohybové charakteristiky byly dále početně zpracovány. V tabulce a v příloze jsou uvádeny římskými číslicemi.

3.3. Popis tahové zkoušky

V rámci sledování poměru Rm/Rm_{oh} byly vzorky vybraných druhů litin s lupínkovým grafitem podrobeny zkoušce prostým tahem. Od každého druhu litiny byly použity minimálně tři zkušební tělíska definovaného tvaru dle ČSN, tak aby získané hodnoty mohly být statisticky vyhodnoceny. Ke zkoušce byl použit universální trhací stroj FPZ 100 VEB THÜRINGER (SRN).

V grafickém znázornění jsou průběhy tahového namáhání litiny značeny arabskými číslicemi (viz. přílohy).

Naměřené hodnoty tahových zkoušek příslušných materiálů jsou uvedeny v tabulce č. 3. Zjištěné průběhy při tahové zkoušce napětí - reformace byly početně zpracovány - derivovány.

3.4. Postup početního zpracování grafických výsledků

Na základě uvedené teorie v literatuře (1) a (2) bylo provedeno převedení průběhu tahových a mikroohybových zkoušek ze souřadnic σ-ε derivováním do souřadnic $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - ε pro tah, resp. σ_{oh} - y do $\frac{d\sigma_{oh}}{dy}$ -y. Derivace tahových charakteristik byly prováděny dle vztahu:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_{(i+1)} - \sigma_{(i)}}{\varepsilon_{(i+1)} - \varepsilon_{(i)}} \qquad (3.1.)$$

kde značí: σ - napětí v tahu
ε - deformace
σ_i - napětí i-tého kroku
ε_i - deformace i-tého kroku

Derivace ohybových charakteristik dle vztahu:

$$\frac{d\sigma_{oh}}{dy} = \frac{\sigma_{oh\,(i+1)} - \sigma_{oh\,(i)}}{y_{(i+1)} - y_{(i)}} \qquad (3.2.)$$

kde značí: σ_{oh_i} - napětí v ohybu v i-tém kroku
y_i - průhyb v i-tém kroku

Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5,a 4.

4. Shrnutí výsledků práce

Cílem této práce bylo ověření možností praktického využití mikroohybové zkoušky pro zkoumání vlastností litiny s lupínkovým grafitem s ohledem na různě silné stěny odlitků.

K měření byly použity tři druhy materiálu, jak je popsáno v kapitole 3.1. Litinové vzorky byly podrobeny zkouškám prostým tahem a mikroohybem, aby byly získány napěťově - deformační závislosti. Tyto závislosti byly dále početně zpracovány - derivovány. Vynesením získaných hodnot do grafu závislosti $\frac{dR}{dy} = f\,(R_{oh})$ pro případ mikroohybu resp. $\frac{dR}{d\varepsilon} = f\,(R)$ pro tah, a po určení zlomů na křivkách byly pro případ této práce získány tyto hodnoty mezních stavů:

pro mikroohyb:

$$R_E = (0{,}28 - 0{,}33)\,.\,Rm_{oh} \qquad (4.1.)$$

$$\sigma_I = (0{,}4 - 0{,}48)\,.\,Rm_{oh} \qquad (4.2.)$$

$$\sigma_{II} = (0{,}79 - 0{,}81)\,.\,Rm_{oh} \qquad (4.3.)$$

pro tah:

$$R_E = (0{,}26 - 0{,}35)\,.\,Rm \qquad (4.4.)$$

$$\sigma_I = (0{,}47 - 0{,}53)\,.\,Rm \qquad (4.5.)$$

$$\sigma_{II} = (0{,}73 - 0{,}79)\,.\,Rm \qquad (4.6.)$$

Což odpovídá vztahům, jež uvádí i Exner. (2.9. - 2.14.) Z těchto výsledků vyplývá, že poměrné hodnoty meze převážně pružných deformací - R_E, meze mikroplastických deformací - σ_I a meze pružně plastických deformací - σ_{II} k příslušným mezím pevnosti se pro tah i mikroohyb téměř shodují. Tento fakt je zřejmě způsoben tím, že se u litiny při ohybu posune neutrální osa do tlakové oblasti a tím se výrazně sníží vliv oblasti namáhané tlakem (mez pevnosti v tlaku je u litin výrazně výšší než v tahu) na hodnoty

R_E, σ_I, σ_{II}

Při porovnání dosažené meze pevnosti v tahu a mikroohybu vzorků litin byl na základě této práce zjištěn následující vztah:

$$Rm_{oh} = (1,87 - 2,1) \cdot Rm \qquad (4.7.)$$

Je pravděpodobné, že při určení velikosti poměru (4.7.) má vliv ten fakt, že se při namáhání ohybem u litin posunuje neutrální osa směrem do tlakové oblasti. Protože při ohybu roste napjatost směrem od neutrální osy do maxima na nejvzdálenějším vlákně, je oblast mamáhaná tahem v oblasti pružně plastických deformací, zatímco oblast namáhaná tlakem stále v oblasti pružných deformací.

Z výsledků měření v této práci je patrné, že s rostoucí tažností se velikost poměru Rm / Rm_{oh} zvyšuje. K ověření tohoto předpokladu je ovšem nutno provést měření na více typech materiálu.

Z výsledků studia napěťově - deformačního namáhání litinových vzorků o různých poměrech stran, jak jsou na základě měření v této práci vyjádřeny v tabulce č. 6., lze vyjádřit názor, že hodnota meze pružně plastických deformací není závislá na změně poměru stran. U meze mikroplastických deformací je již znát jistá závislost, jejímž důsledkem je hodnota této meze u vzorků s maximální výškou ke vzorkům s maximální šířkou zhruba 1,4 krát vyšší. U meze převážně pružných deformací je tento rozdíl ještě patrnější, rozdíl činí asi 1,7 násobek.

To je zřejmě způsobeno tím, že u litin se při ohybu posune neutrální osa do tlakové oblasti, a při stavu, kdy je dominujícím rozměrem výška se již může projevit okolnost, že litina má v tahu rozdílné vlastnosti než v tlaku.

Tento předpoklad lze vyslovit i přesto, že při měření docházelo vlivem dosedání vzorku a poruch zapisovače u počátku

většiny ohybových křivek k nepřesnostem. V této souvislosti je třeba poznamenat, že nebylo přistoupeno k aproximaci,neboť by docházelo k nepřehlednosti výsledků.

Výsledky měření v této práci potvrdily možnost využití mikroohybové zkoušky pro zkoumání vlastností tenkostěnných odlitků z litiny s lupínkovým grafitem, neboť jak vyplývá ze vzorců (4.1. - 4.3.), mají v této práci naměřené hodnoty mezních stavů téměř shodnou velikost jako hodnoty uváděné Exnerem (2.9. - 2.14.). Tím byl potvrzen předpoklad, že teorie mikroplastických deformací se může projevit i u mikroohybové zkoušky.

5. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá rozborem charakteristik mikroohybové zkoušky s ohledem na možnost praktického využití mikroohybové zkoušky pro určování kvality tenkostěnných odlitků.

Tato práce je rozdělena na 2 části.

V první části práce jsou shromážděny teoretické podklady, jež byly využity při vlastních experimentech.

Zde je nejprve seznámení s vlastnostmi litiny s lupínkovým grafitem a popsáno různé chování litiny s lupínkovým grafitem při různých stavech napjatosti. Dále je zde seznámení se současným stavem sledování mezních stavů litiny s lupínkovým grafitem při mechanickém namáhání. Je zde zdůvodněno, proč se litiny neřídí Hookovým zákonem a vysvětlen způsob vyhodnocování deformačních charakteristik, jak byly dále v této práci využívány.

Dále jsou zde popsány důvody, jež vedly pro vyhodnocování mechanických vlastností litin v tenkých stěnách k zavedení mikroohybové zkoušky a zdůrazněna výhodnost jejího využití pro malá zkušební tělíska.

Mikroohybová zkouška v této práci byla prováděna pomocí přípravku vyvinutým v s.p. Liaz. Je zde popis zařízení a blokové schéma tohoto přípravku.

V přehledu napěťově - deformačního namáhání litiny s lupínkovým grafitem je poukázáno na rozdíly mezi rozložením napětí při ohybu pro ocel a litinu a vysloven předpoklad, že teorie mikroplastických deformací by se mohla dle Exnera projevit i u mikroohybové zkoušky. Je zde zdůrazněno, proč má především u tenkostěnných odlitků litiny s lupínkovým grafitem velký význam znalost reálných vlastností.

Poznatky získané v této části práce jsou využity ve druhé části práce, jež se zabývala vlastním měřením.

Zde jsou nejprve charakterizovány materiály používané při experimentu a provedeny jejich metalografický rozbor. Za účelem získání napěťově - deformačních charakteristik byla provedena se vzorky daných materiálů zkouška prostým tahem a mikroohybová zkouška. Po provedení početního zpracování těchto charakteristik byly získány vztahy, jež jsou uvedeny v shrnutí výsledků práce. Z nich vyplývá, že využití mikroohybové zkoušky pro potřebu získání znalostí vlastností litin s lupínkovým grafitem pro tenkostěnné odlitky je výhodné, neboť získané hodnoty v této práci jsou takřka shodné s hodnotami,jež uvádí Exner.

Z tohoto důvodu lze doporučit, aby se rozšířilo využití mikroohybové zkoušky a dále byla propracována studie zkoumání vzorků s různým poměrem stran, jelikož v této práci nebyly použity vzorky s větším poměrem stran než 1:2,5.

Veškeré závislosti jež byly využity pro určení hodnot mezních stavů, jakož i tahové a ohybové charakteristiky jsou uvedeny v příloze této práce.

Označení vzorku	typ	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ce
1	normální 25	3,3	0,85	1,94	0,117	0,116	0,06	3,81
2	legovaná 25 (Cr,Cu,Ni)	3,29	0,84	1,98	0,117	0,108	0,3	3,8
3	tav.s nízk. obsahem S	3,53	0,37	2,18	0,071	0,037	0,15	4,1

Tabulka č.1 : Chemický rozbor použitých materiálů

vzorek	materiál	F_{oh} (N)	Rm_{oh} (MPa)	y (mm)
I.	1	530	471	0,55
		630	560	0,65
	2	610	542	0,46
		650	577	0,5
	3	680	604	0,72
		550	489	0,62
II.	1	530	588	0,56
		470	522	0,6
	2	510	566	0,45
		510	566	0,52
	3	470	522	0,65
		480	533	0,78
III.	1 a	290	644	0,65
		290	644	0,6
		270	600	0,55
	1	1195	573	0,45
		1100	528	0,43
		1150	552	0,38
	2 a	280	622	0,45
		240	533	0,45
		270	600	0,5
	2	1180	566	0,35
		1200	576	0,32
		1125	540	0,32
	3 a	260	577	0,65
		250	555	0,65
		220	488	0,6
	3	1095	520	0,48
		1100	528	0,46
		1050	500	0,47

Tabulka č. 2: Hodnoty mikroohybových zkoušek

Pokračování tab. č. 2

IV.	1	930	516	0,28
		950	527	0,28
	2	930	516	0,25
		940	521	0,24
	3	890	494	0,35
		920	510	0,34
V.	1	1570	558	0,28
		1490	529	0,26
	2	1760	625	0,21
		1660	589	0,23
	3	1350	480	0,28
		1400	497	0,29

Tabulka č. 2: Hodnoty mikroohybových zkoušek

materiál	F (kN)	Rm (MPa)	ø Rm (MPa)	ø Rm_{oh} (MPa)	Rm_{oh}/Rm
1	22,4 22 22,1	285,2 280,1 281,4	282,2	551,1	1,95
2	21,2 24,6 24,5	269,9 313,2 311,9	298,6	560,8	1,87
3	19,2 19,2 19,3	244,4 244,4 245,7	244,8	516	2,1

Tabulka č. 3: Hodnoty tahových zkoušek

vzorek	materiál	Rm_{oh} (MPa)	Re (MPa)	R_E/Rm_{oh}	σ_I (MPa)	σ_I/Rm_{oh}	σ_{II} (MPa)	σ_{II}/Rm_{oh}
I	1	560	143	0,26	210	0,38	456	0,81
	2	577	166	0,28	300	0,51	475	0,82
	3	489	128	0,26	230	0,41	380	0,77
II	1	588	190	0,32	276	0,45	460	0,78
	2	566	170	0,3	270	0,47	510	0,89
	3	522	134	0,25	228	0,43	386	0,73
III	1 a	600	180	0,3	270	0,45	470	0,78
	2 a	600	153	0,26	211	0,35	477	0,79
	3 a	555	174	0,31	204	0,36	392	0,7
	1	552	168	0,3	246	0,44	456	0,82
	2	566	170	0,3	260	0,45	470	0,83
	3	528	186	0,35	330	0,62	470	0,89
IV	1	516	234	0,45	288	0,55	416	0,8
	2	516	217	0,42	250	0,48	338	0,65
	3	494	214	0,43	316	0,63	404	0,81
V	1	558	226	0,4	305	0,54	425	0,76
	2	625	330	0,52	405	0,64	527	0,84
	3	480	194	0,41	256	0,53	426	0,88

Tabulka č. 4: Hodnoty mezních stavů v mikroohybu

Vzorek	Rm (MPa)	Re (MPa)	R_e/Rm	σ_I (MPa)	σ_I/Rm	σ_{II} (MPa)	σ_{II} /Rm
1	285,2	91,7	0,32	134,5	0,47	226,1	0,79
	280,1	81,5	0,3	146	0,52	224,1	0,8
2	269,9	71,3	0,27	142,6	0,52	203,1	0,75
	313,2	77,4	0,25	171,1	0,54	242,4	0,77
3	244,4	81,5	0,33	105,9	0,43	171,1	0,7
	244,4	91,7	0,37	126,3	0,51	181,3	0,75

Tabulka č.5: Hodnoty mezních stavů v tahu

vzorek	h/b	ø Re/Rm_{oh}	ø σ_I/Rm_{oh}	ø σ_{II}/Rm_{oh}
I	0,4	0,26	0,43	0,8
II	0,5	0,29	0,45	0,8
III	1	0,30	0,44	0,8
IV	2	0,43	0,55	0,76
V	2,5	0,44	0,57	0,82

Tabulka č. 6: Hodnoty mezních stavů v mikroohybu v závislosti na poměru b/h

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit poděkování ing. Ivě Nové za odborné vedení při zpracovávání této diplomové práce.

Jan Šeřík

6. Seznam použité literatury

1/ Exner, J. - Čech, J.: O některých fyzikálních vlastnostech dynamiky namáhaných automobilových odlitků ze šedé litiny. In: 49. International Foundry Congress. ref.20. Chicago 1982.

2/ Exner, J. - Meduna, O. - Čech, J. - Bilčák, M.: Možnosti hodnocení spolehlivosti litinových odlitků při dynamickém zatěžování. In: XVII. celostátní konference pracovníků automobilového průmyslu. Sborník prací. Dům techniky ČSVTS Ústí nad Labem 1987.

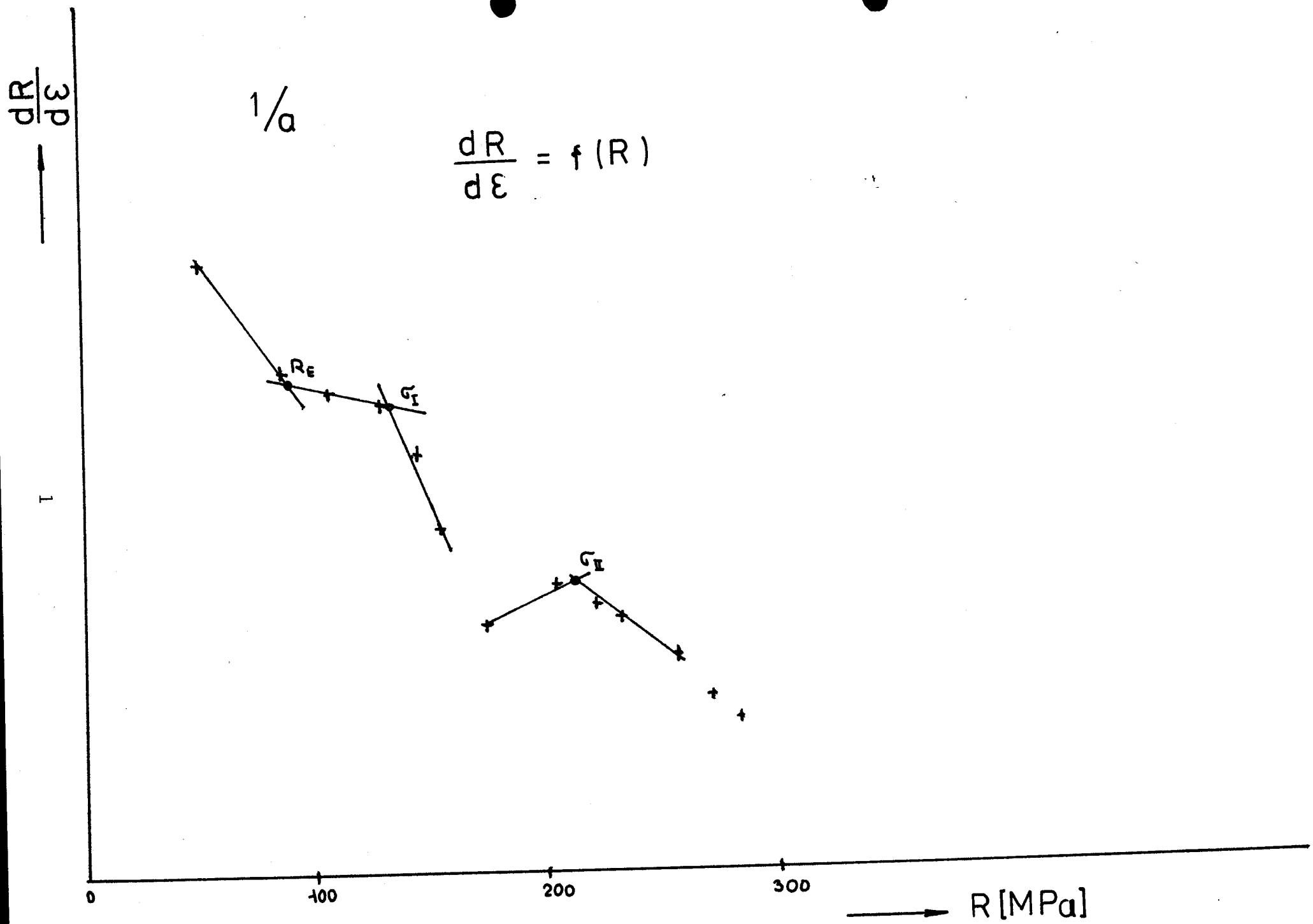
3/ Veles, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. 1. vydání Praha 1985.

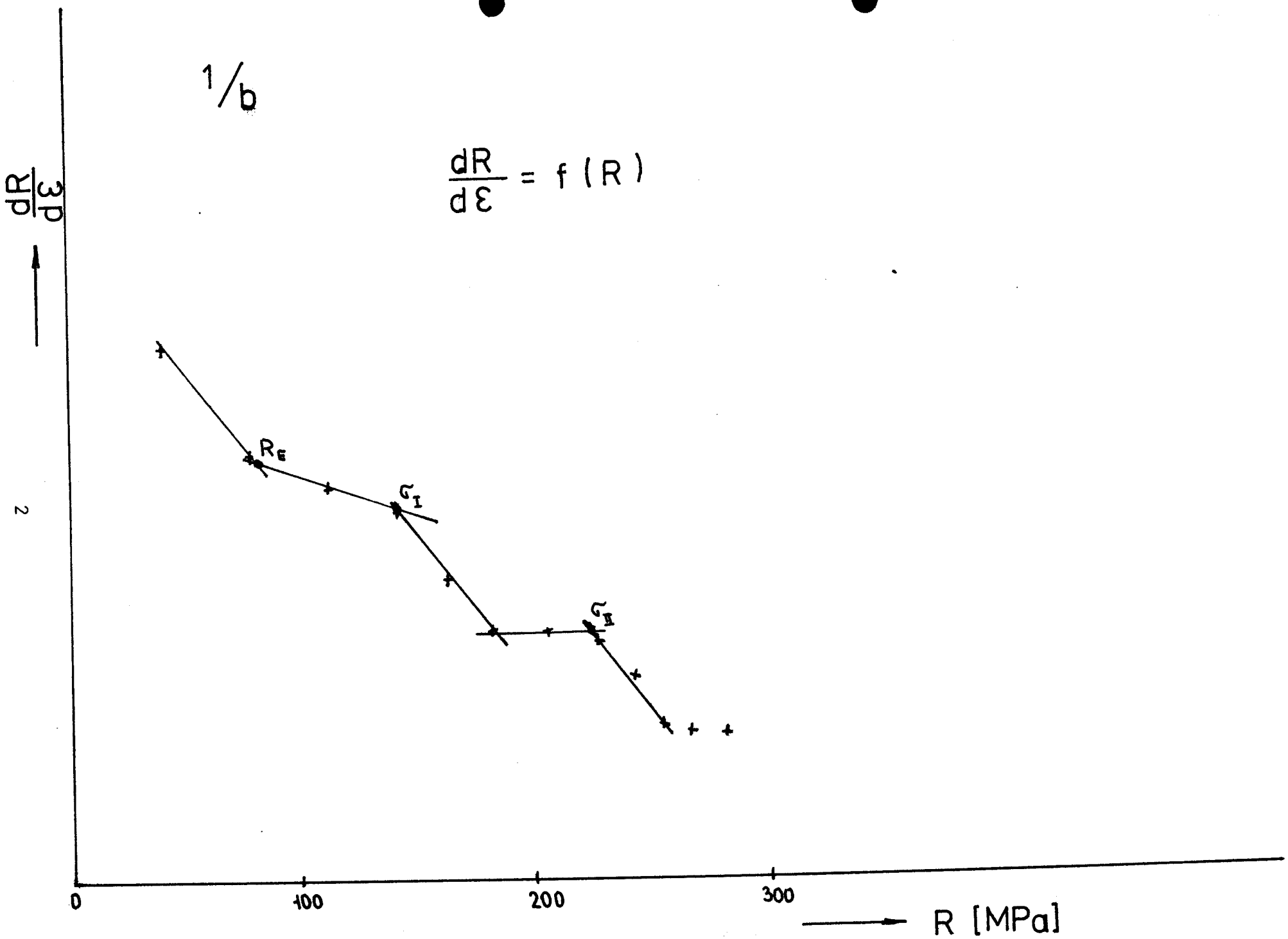
4/ Nándory, G. - Pál, J. - Dül, J. - Koreň, J.: Slévarenství, XXXVIII, 1990, č. 7, s. 286.

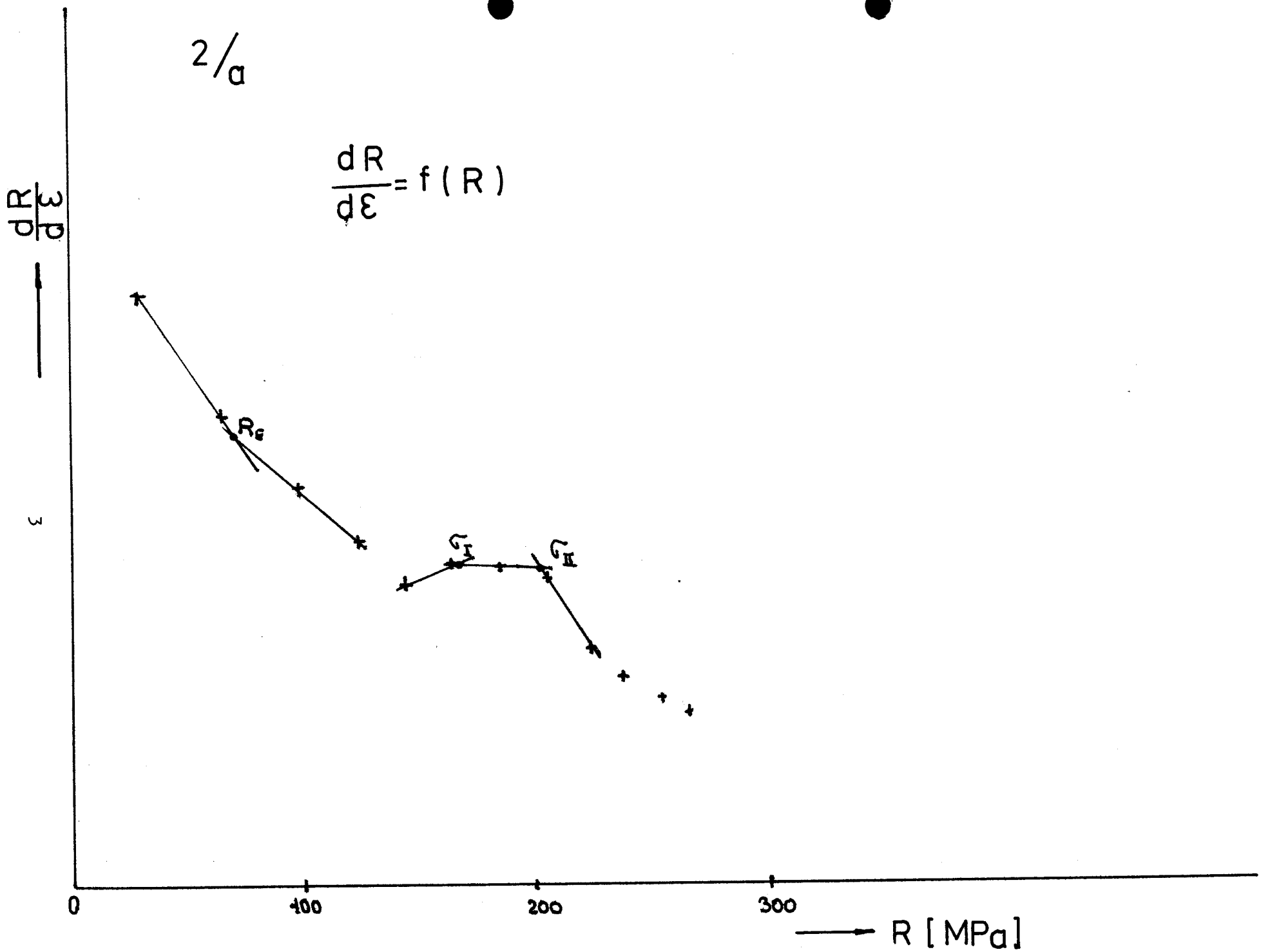
5/ Hyška, A.: Mikroohybová zkouška litin. (Diplomová práce). Liberec 1990. VŠST. Fakulta strojní.

7. Seznam příloh:

- derivované tahové křivky $\frac{dR}{d\varepsilon} = f(R)$ /1-6/
- derivované ohybové křivky $\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$ /7-24/
- ohybové křivky $R_{oh} = f(y)$ /25-35/
- tahové křivky $R = f(\varepsilon)$ /36-37/

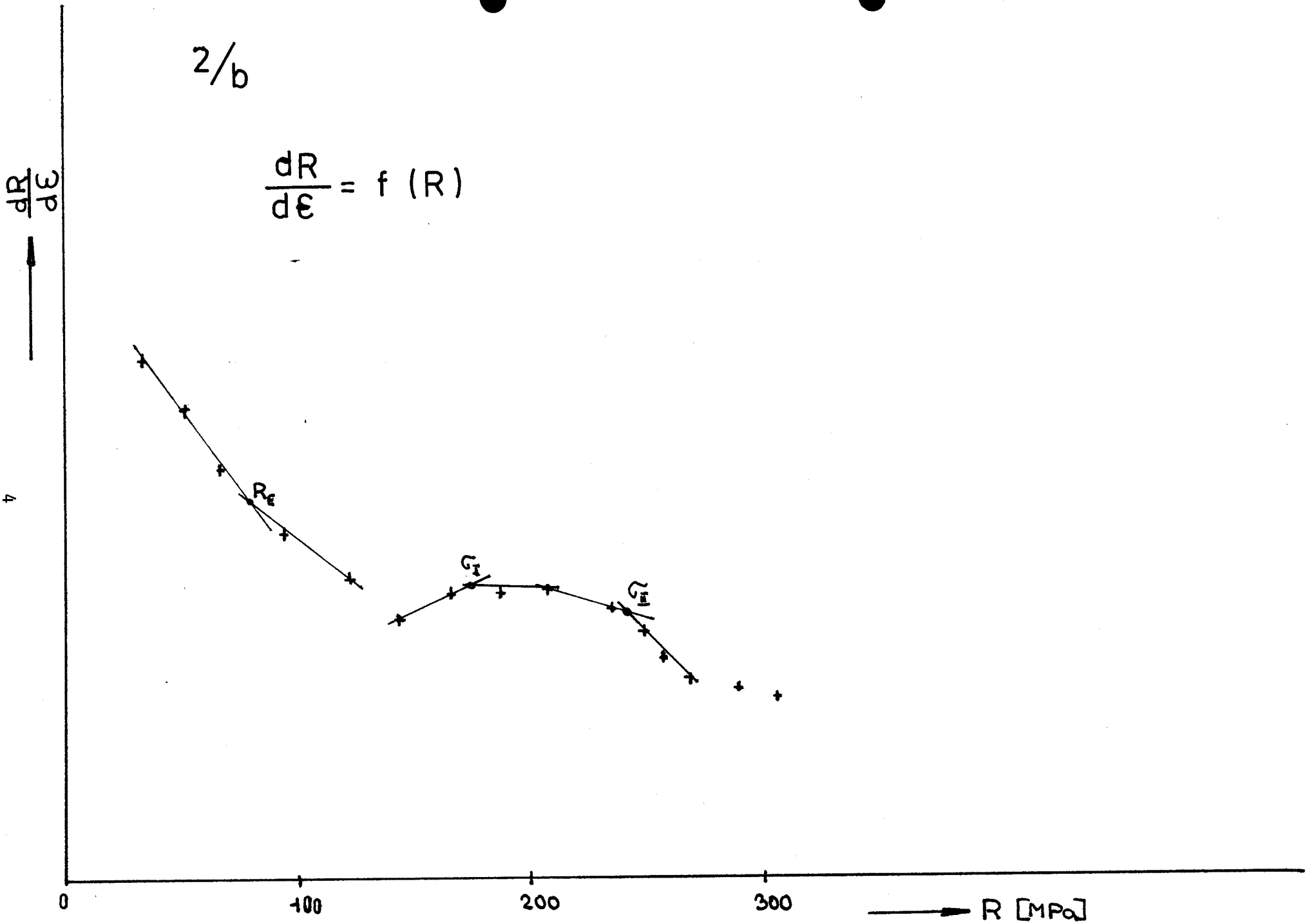

1/a
$\frac{dR}{d\varepsilon} = f(R)$
$\frac{dR}{3p}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
R [MPa]


1/b
dR/dε = f (R)
dR/3p
R_E
σ_I
σ_II
0
100
200
300
R [MPa]

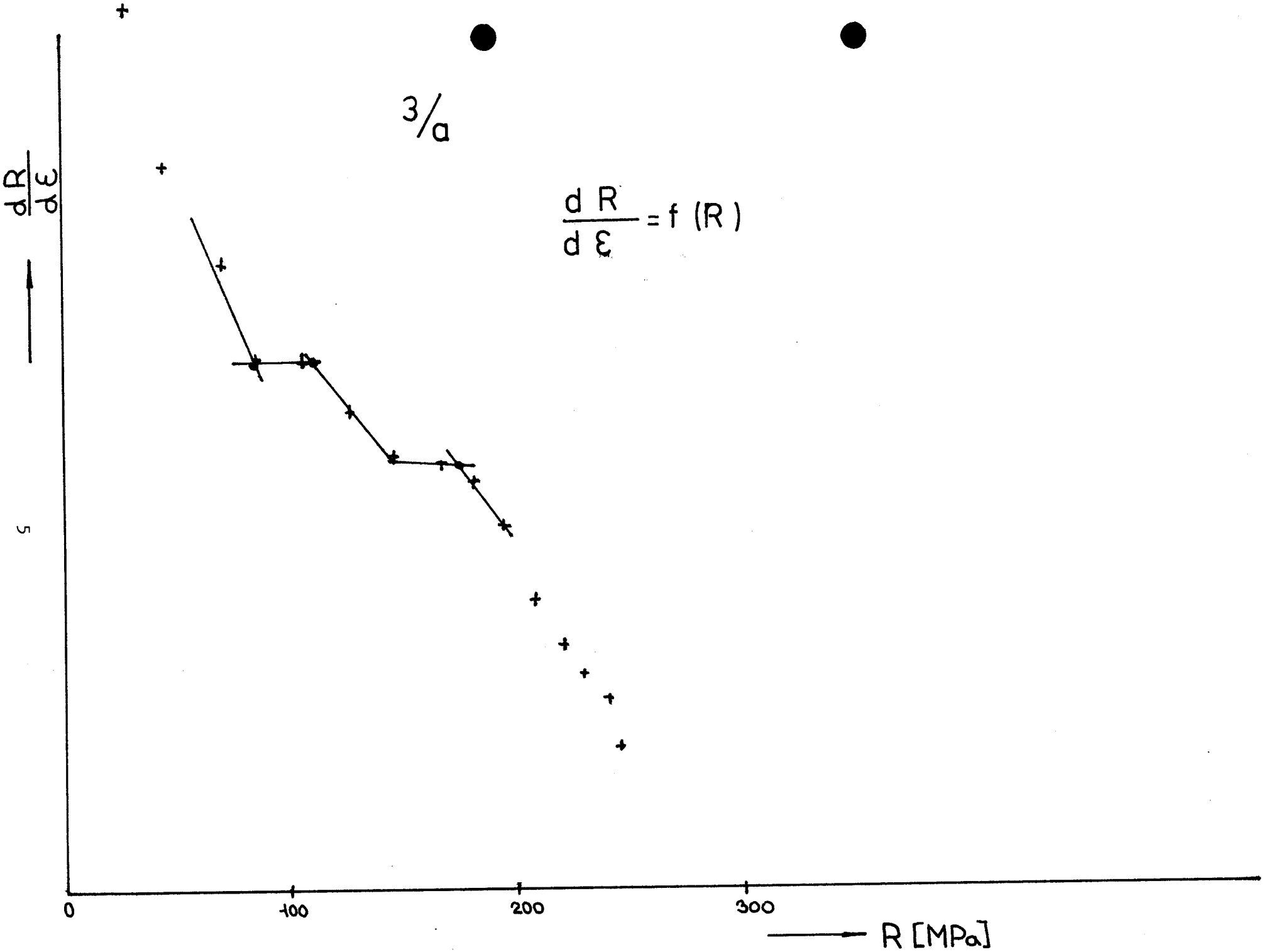

2/a
dR/dε = f(R)
dR/dε
R_E
σ_I
σ_II
0
100
200
300
R [MPa]

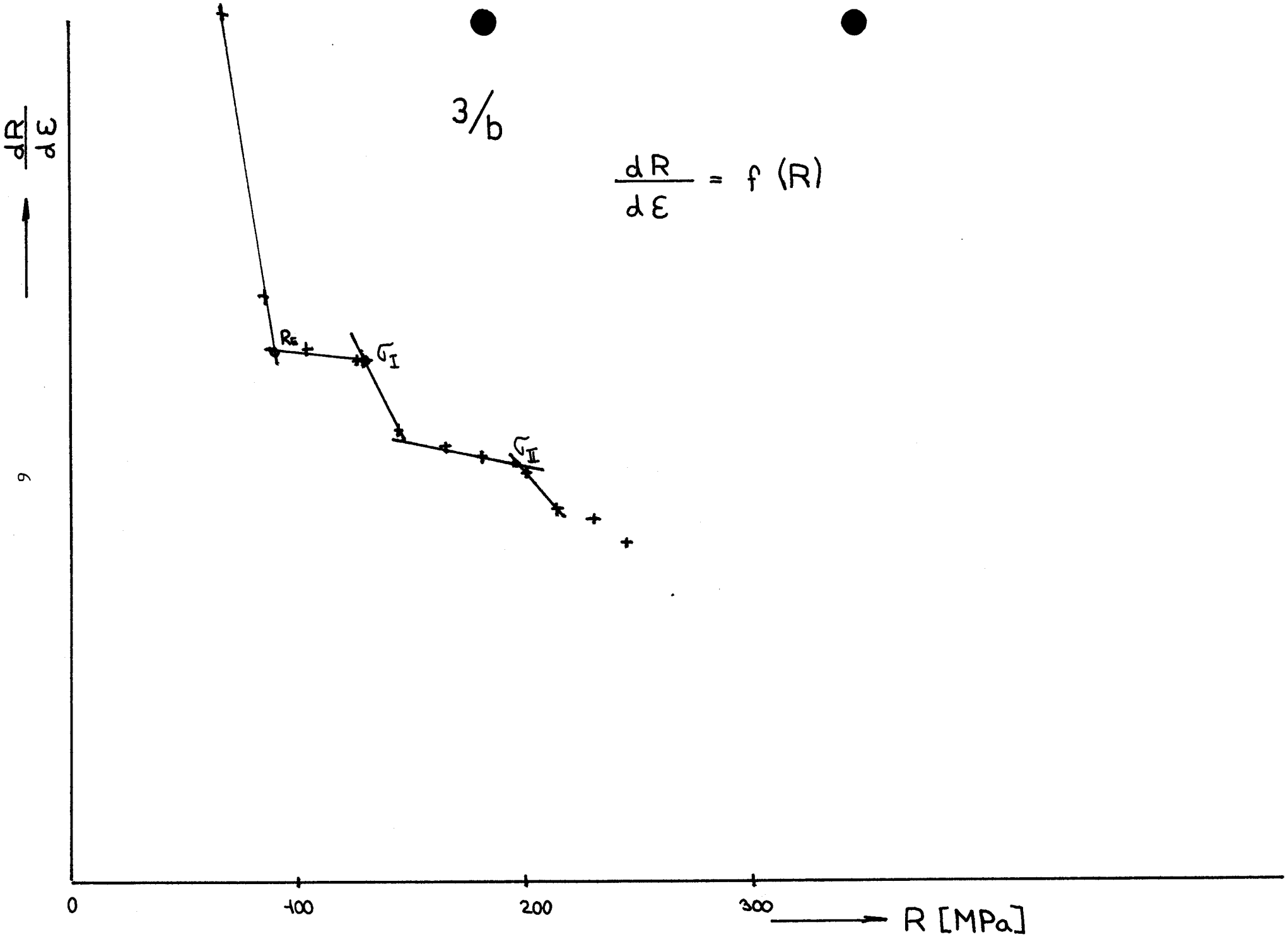
2/b

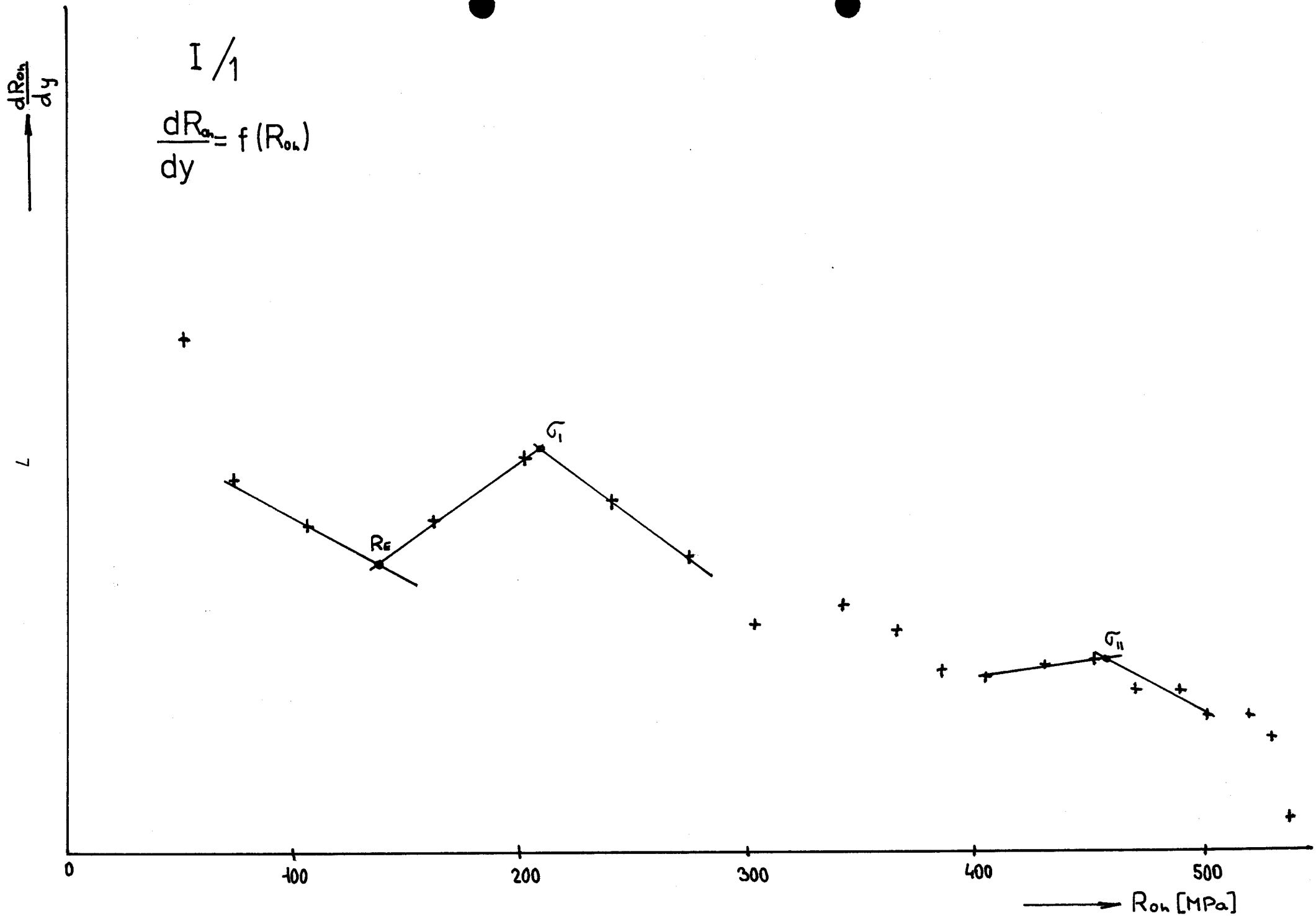
$$\frac{dR}{d\varepsilon} = f(R)$$

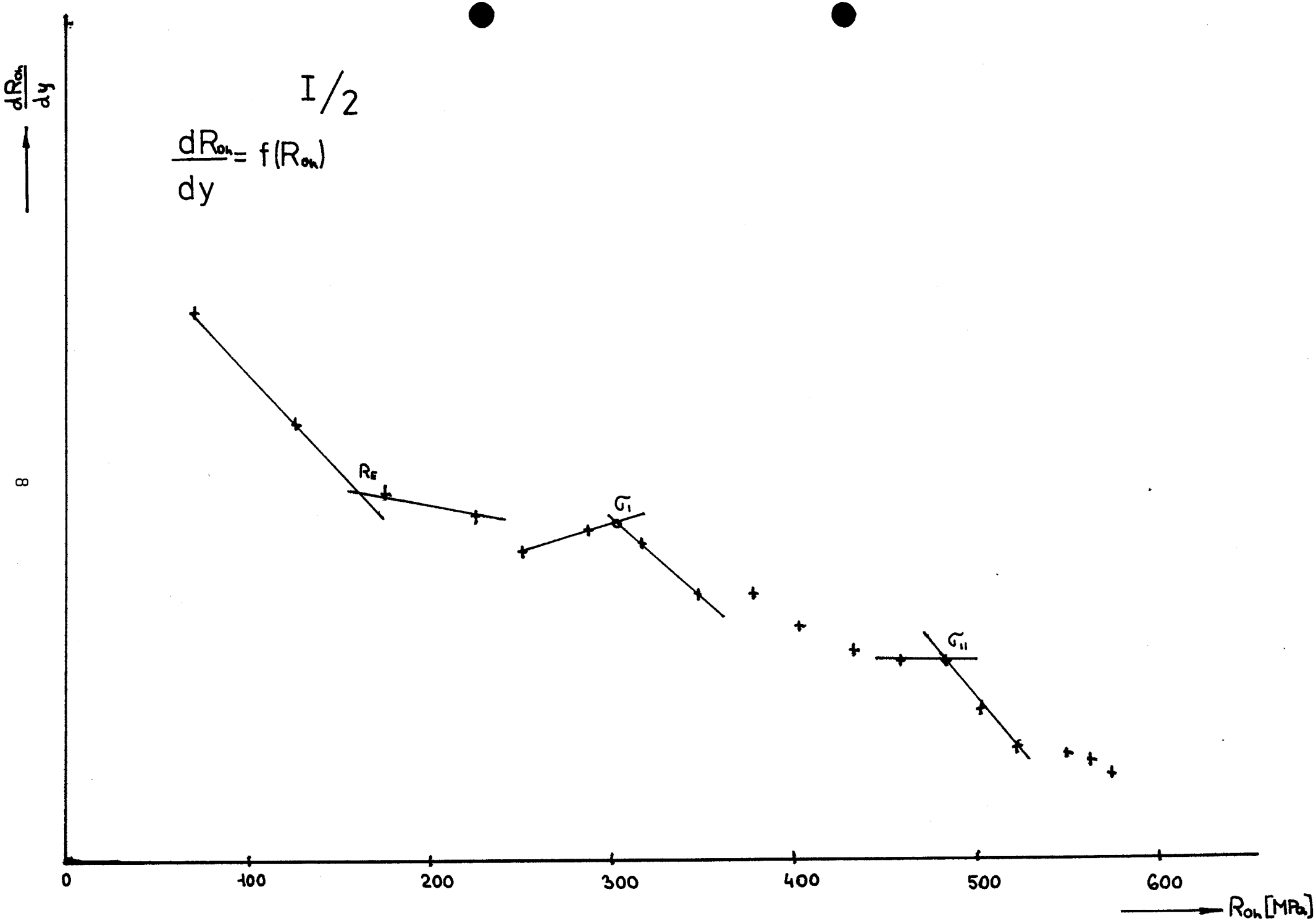


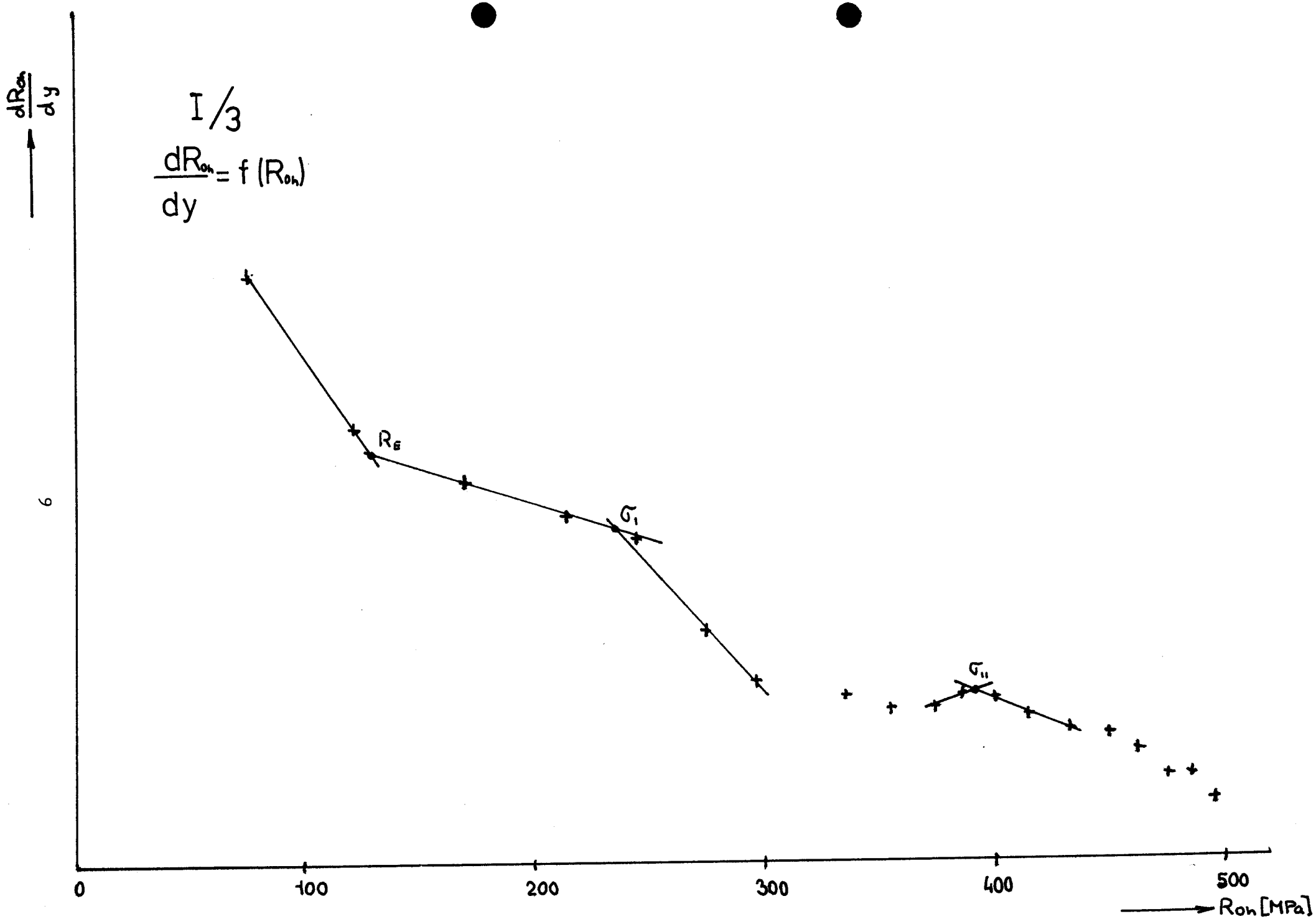
3/a

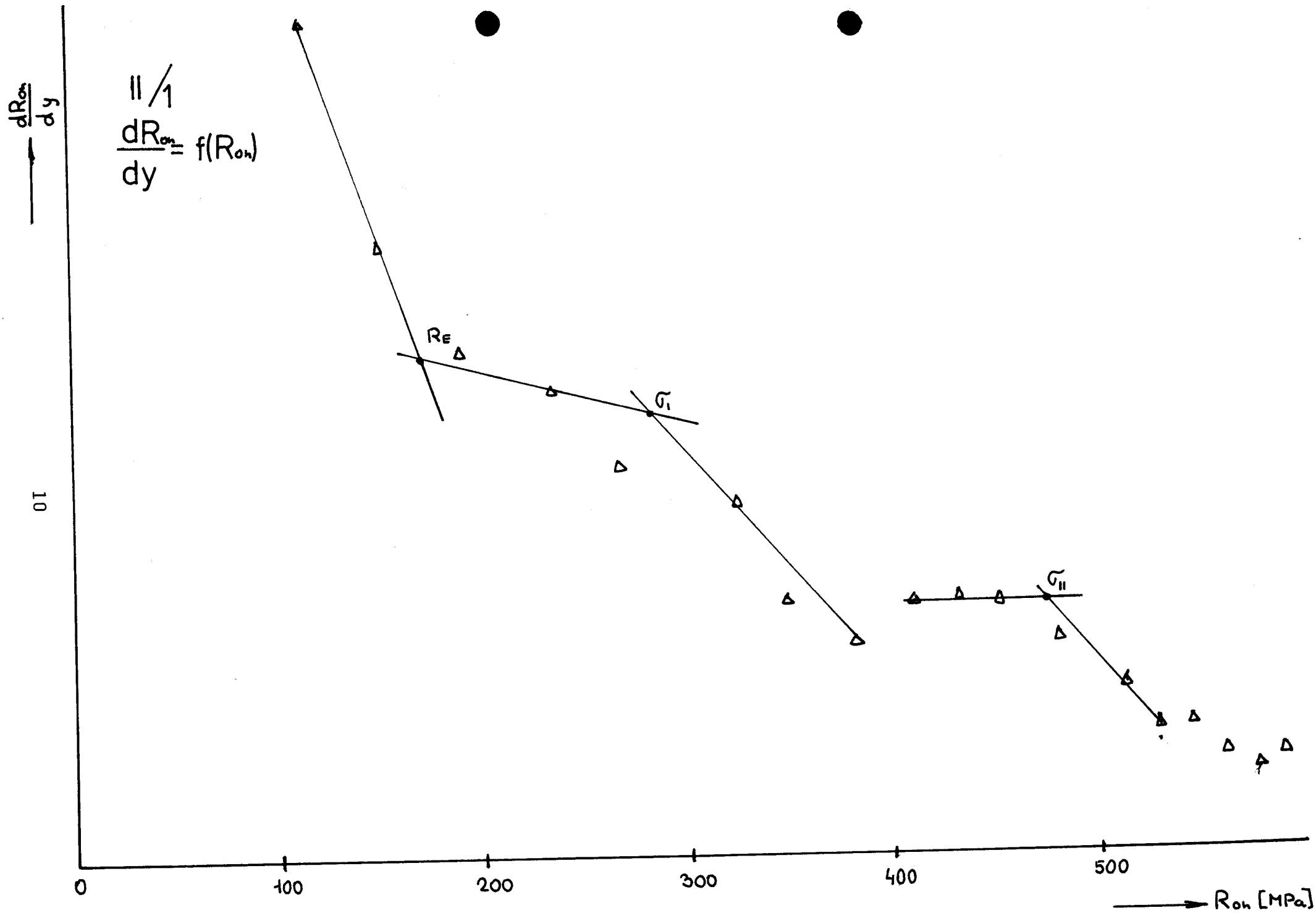

$\frac{dR}{d\varepsilon} = f(R)$
$\frac{dR}{d\varepsilon}$
0
100
200
300
R [MPa]

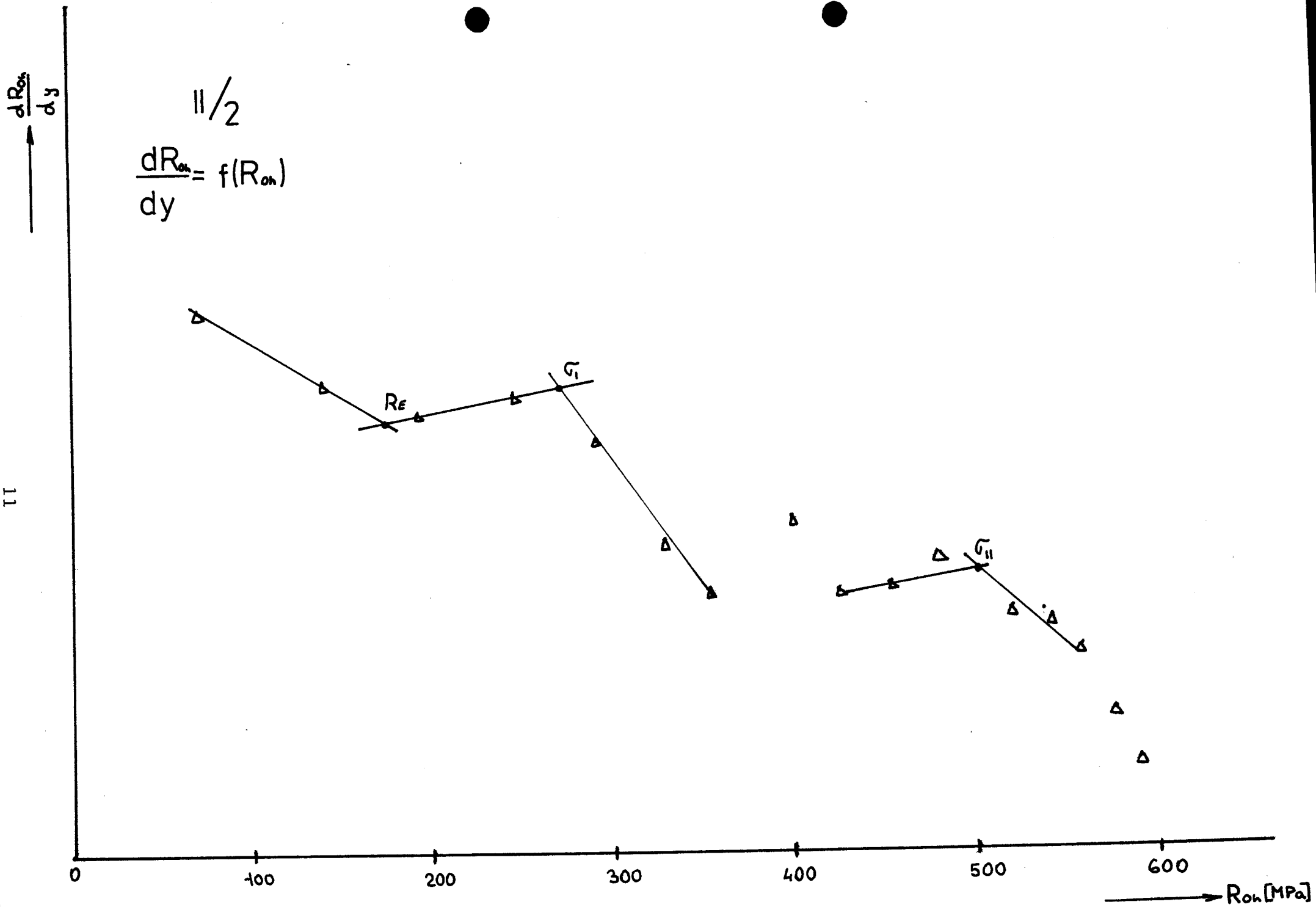

3/b
$\frac{dR}{d\varepsilon} = f(R)$
$\frac{dR}{d\varepsilon}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
R [MPa]

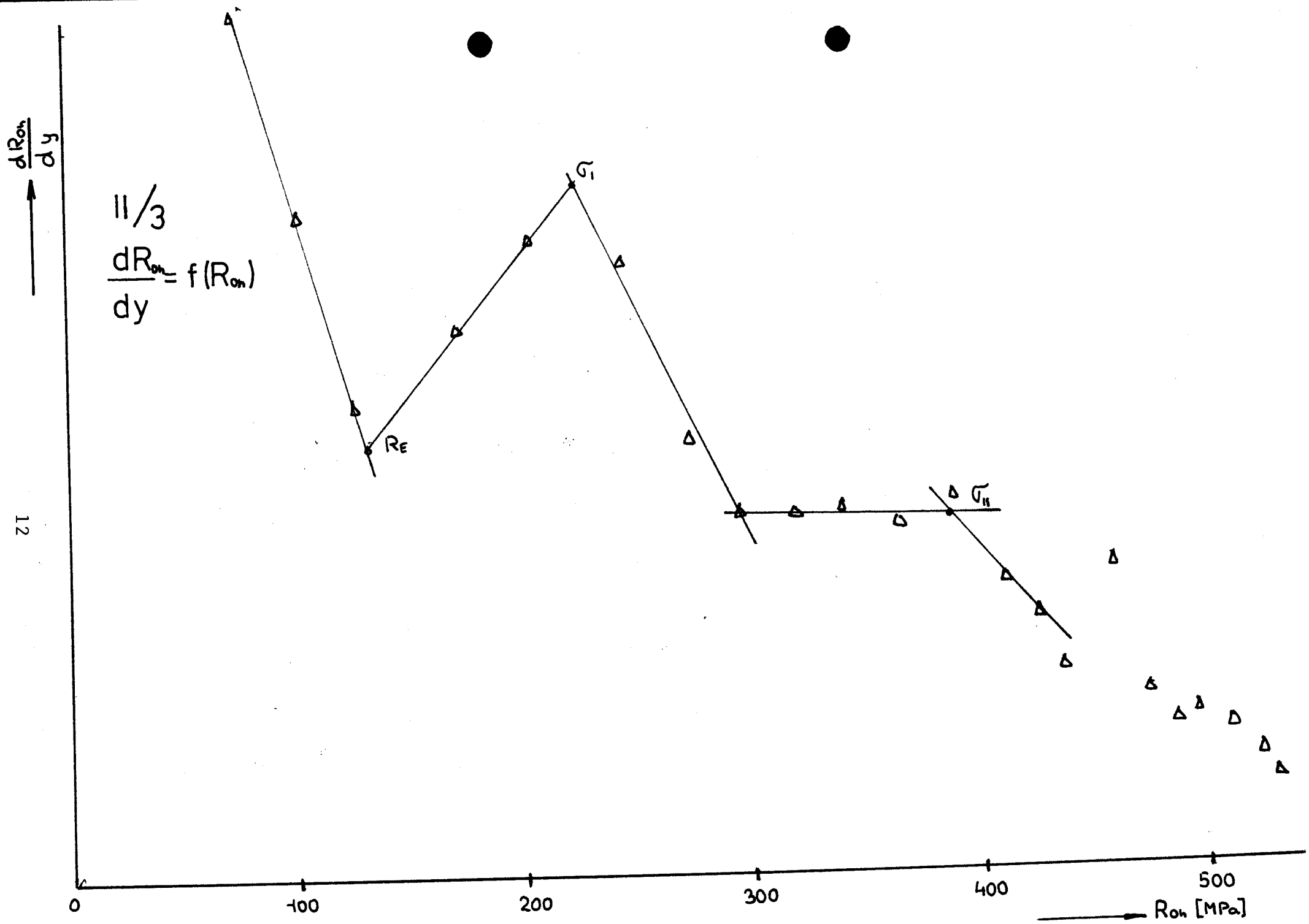

I/1
$\frac{dR_{on}}{dy} = f(R_{on})$
$\frac{dR_{on}}{dy}$
σ_I
R_E
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{on} [MPa]

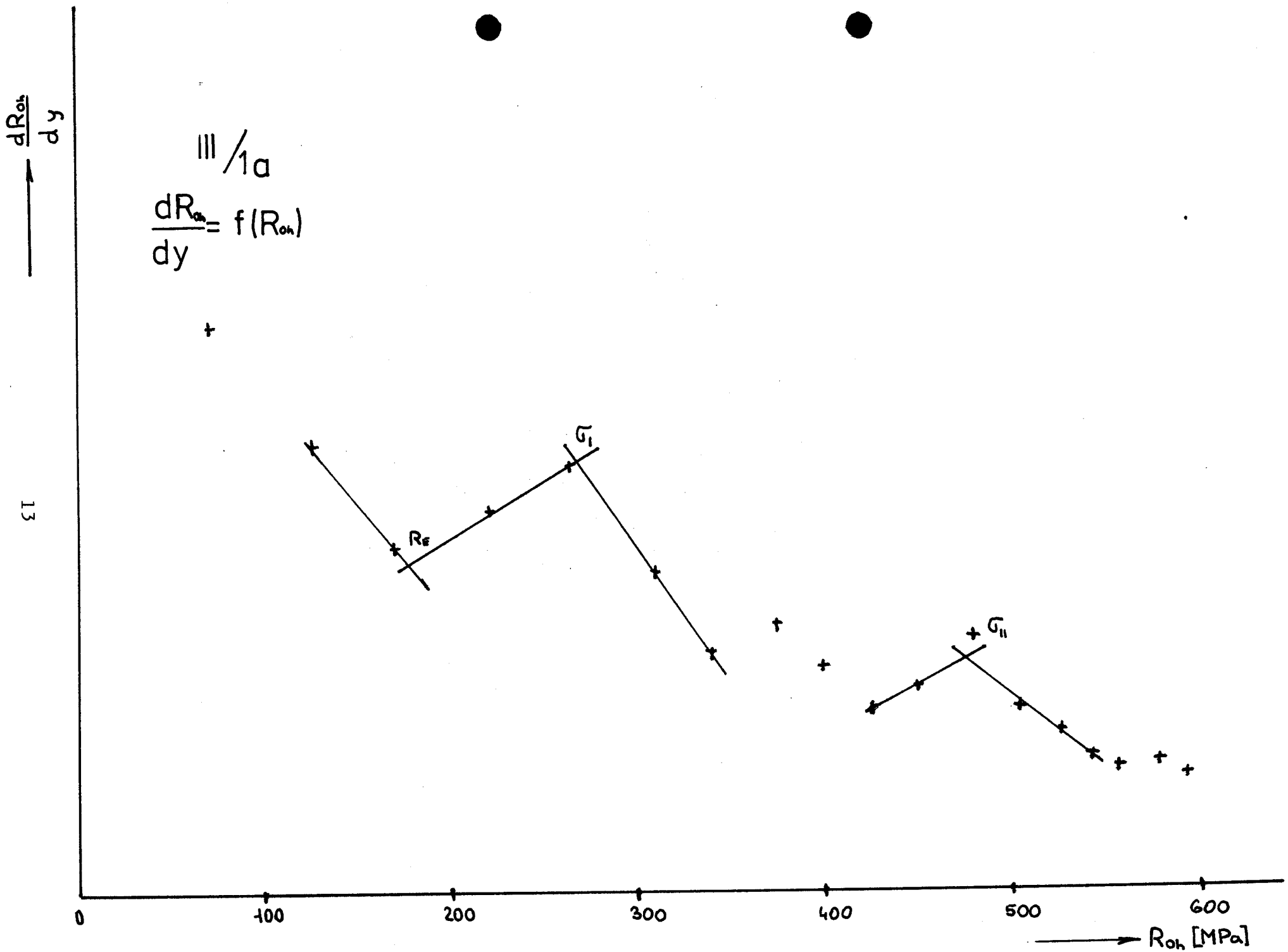

I/2
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
600
R_{oh} [MPa]

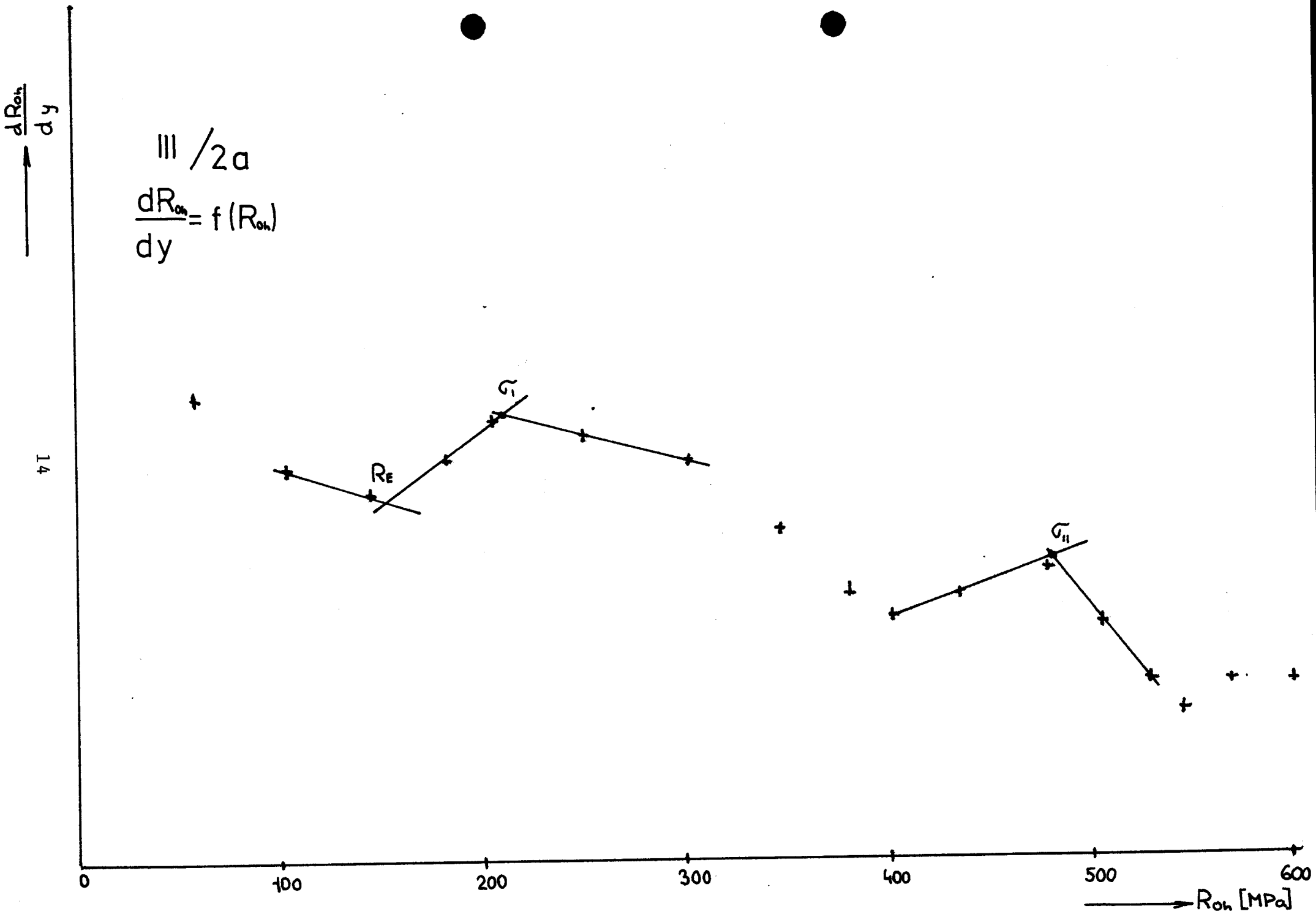

I/3
$\frac{dR_{on}}{dy} = f(R_{on})$
$\frac{dR_{on}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{on} [MPa]

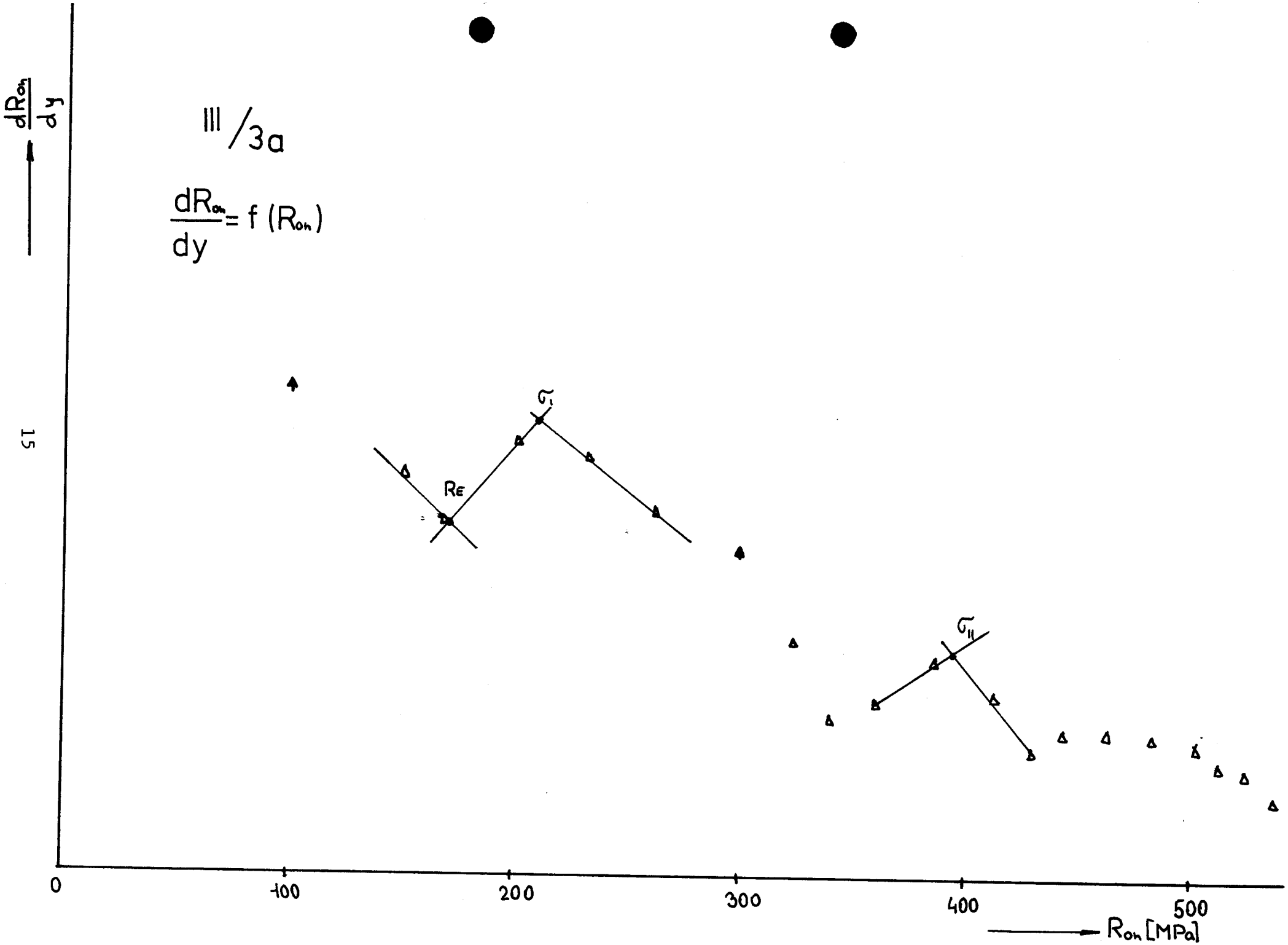

II/1
$\frac{dR_{on}}{dy} = f(R_{on})$
$\frac{dR_{on}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{on} [MPa]

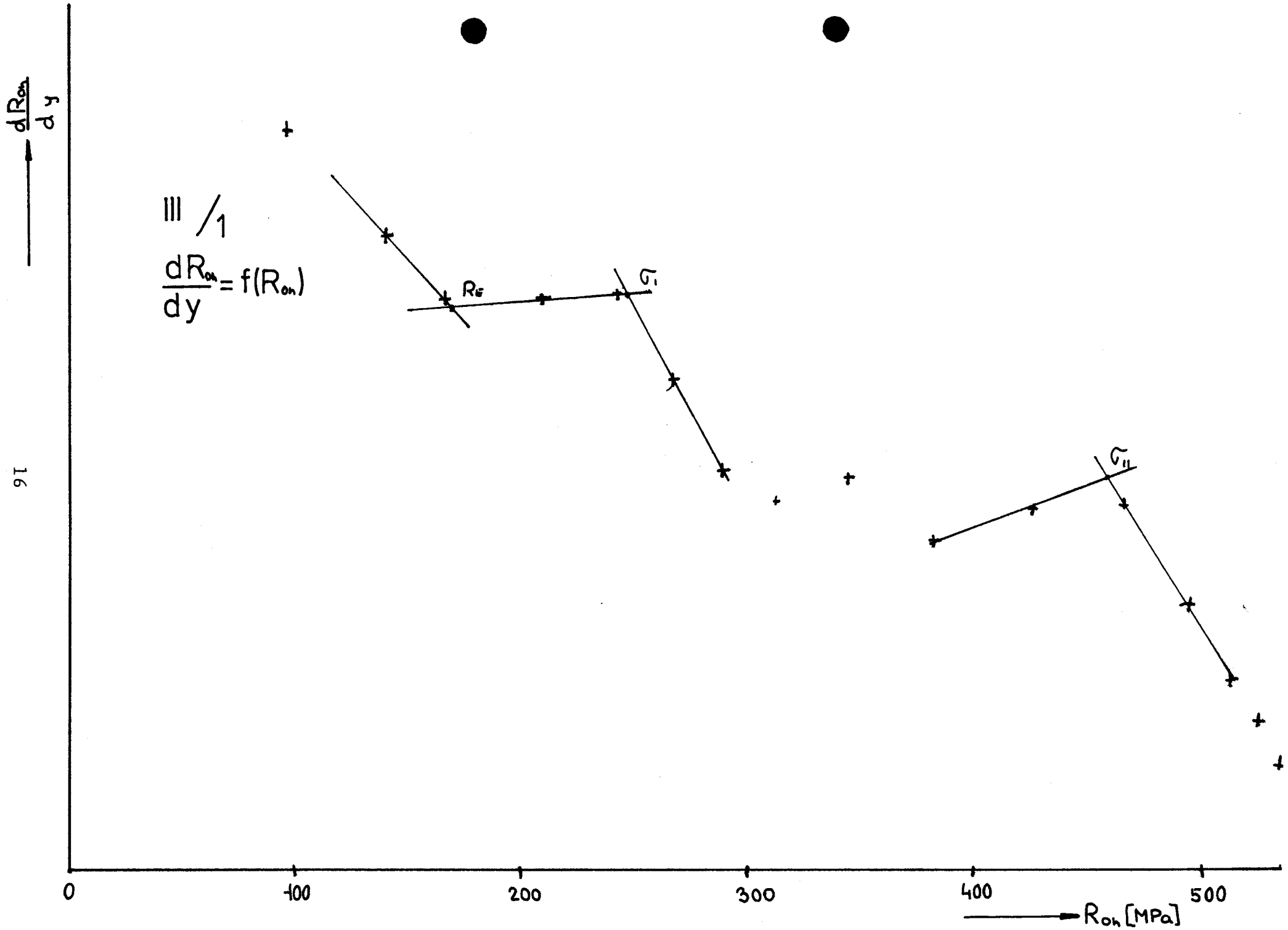

II/2
dRoh/dy = f(Roh)
dRoh/dy
RE
σI
σII
0
100
200
300
400
500
600
Roh [MPa]

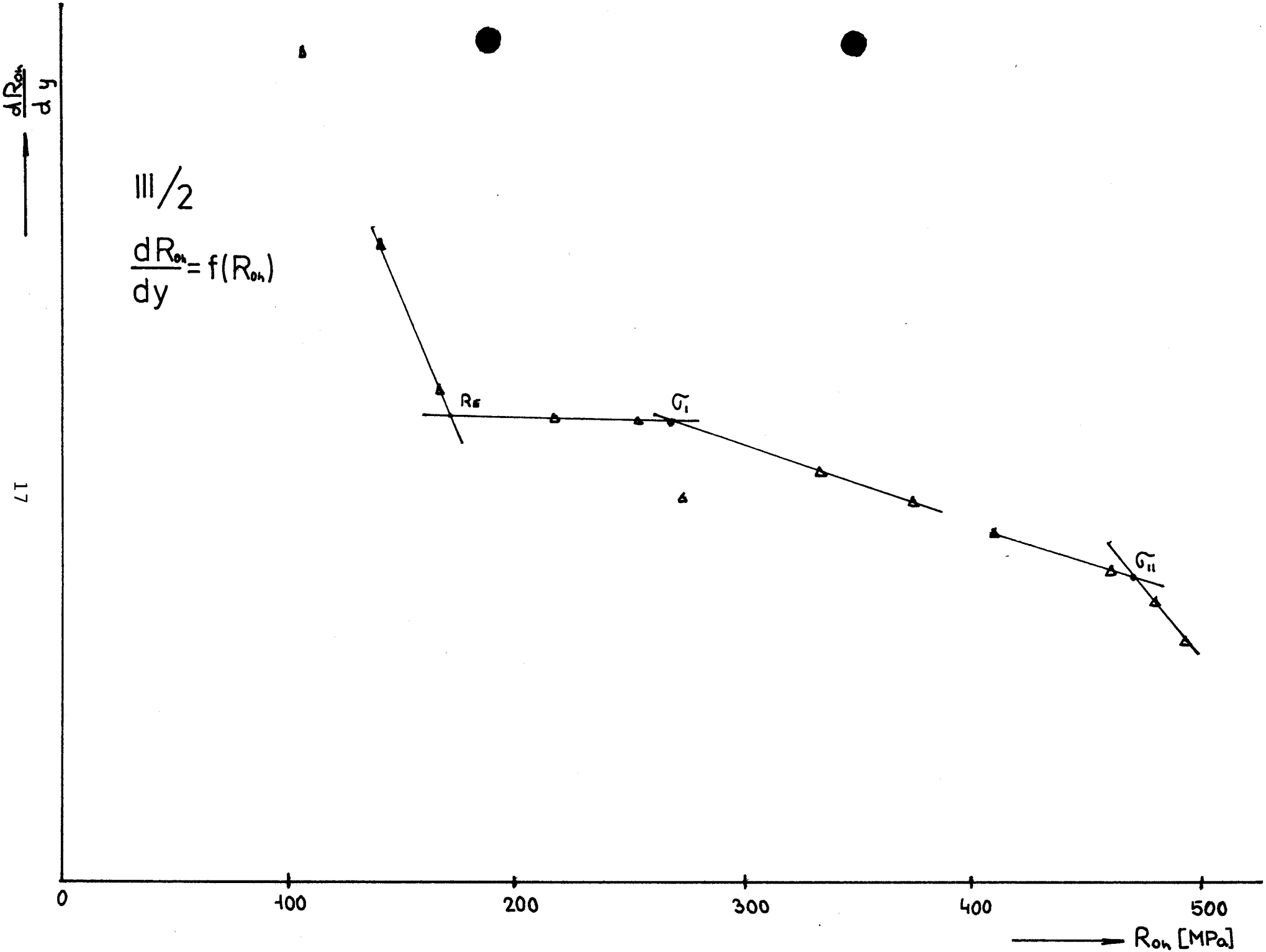

II/3
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]

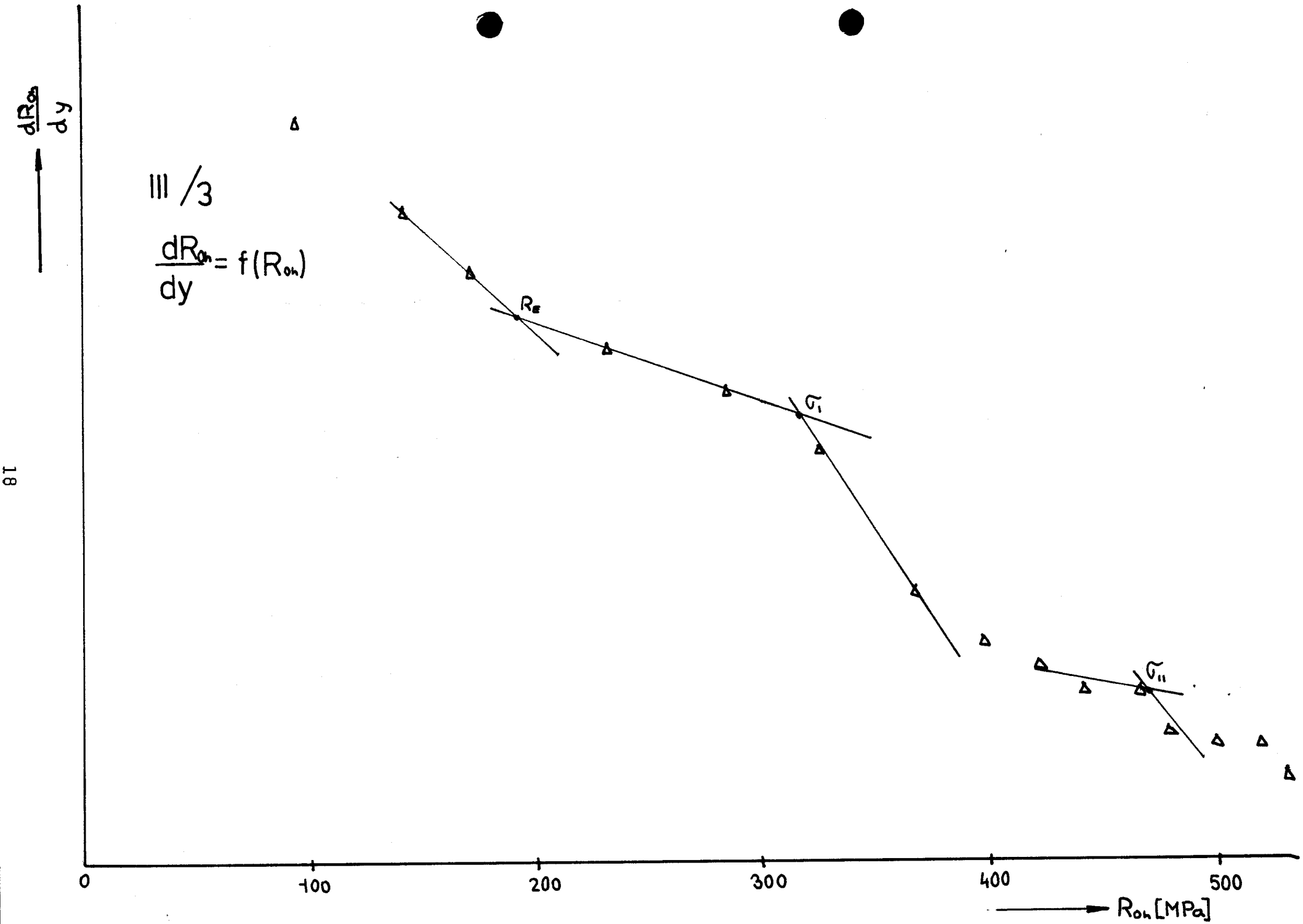

III/1a
dRoh/dy = f(Roh)
dRoh/dy
Roh [MPa]
0
100
200
300
400
500
600
RE
σI
σII

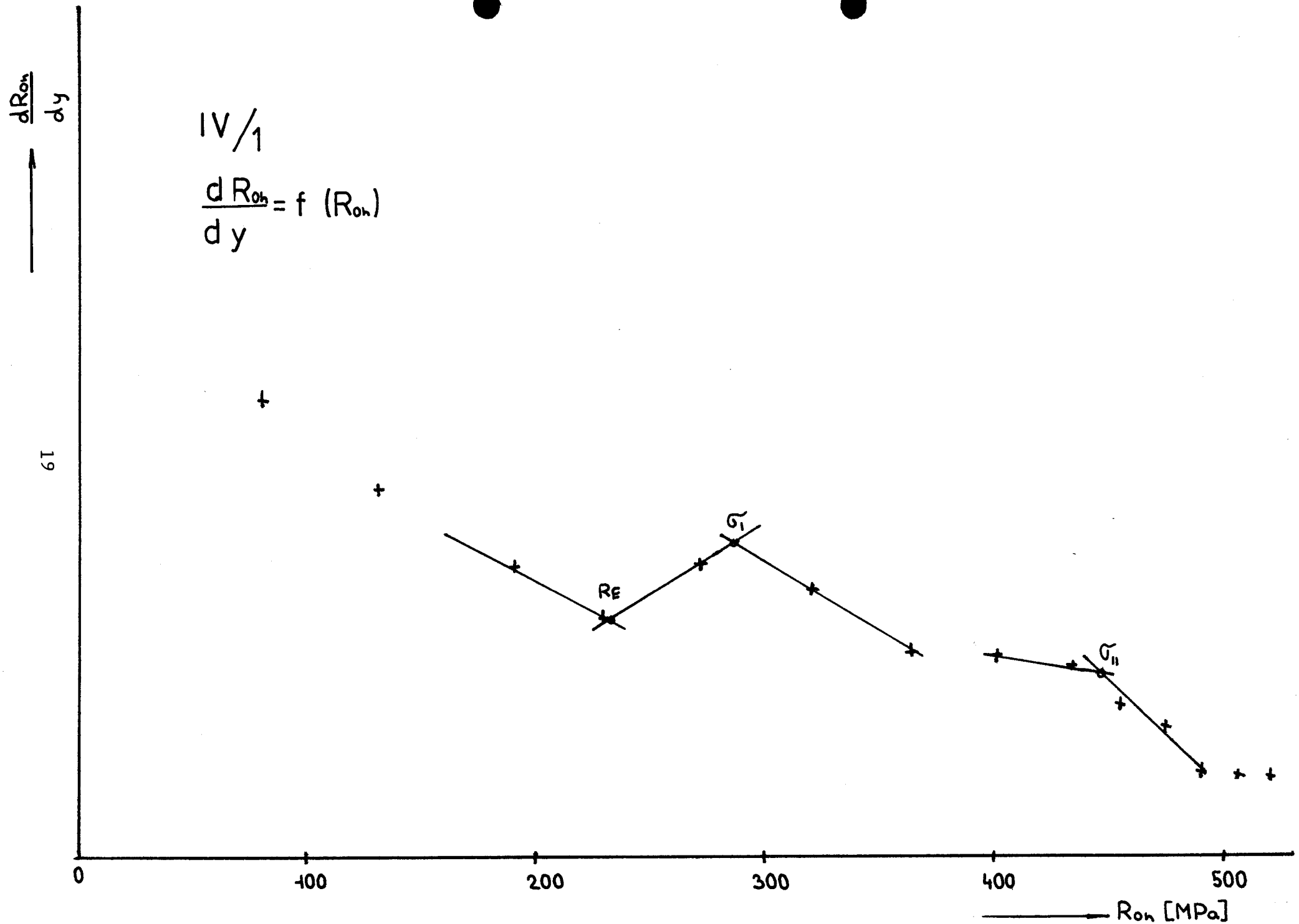

III /2a
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
600
R_{oh} [MPa]


III/3a
$\frac{dR_{on}}{dy} = f(R_{on})$
$\frac{dR_{on}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{on} [MPa]


III /1
$\frac{dR_{on}}{dy} = f(R_{on})$
R_E
σ_I
σ_{II}
$\frac{dR_{on}}{dy}$
0
100
200
300
400
500
R_{on} [MPa]

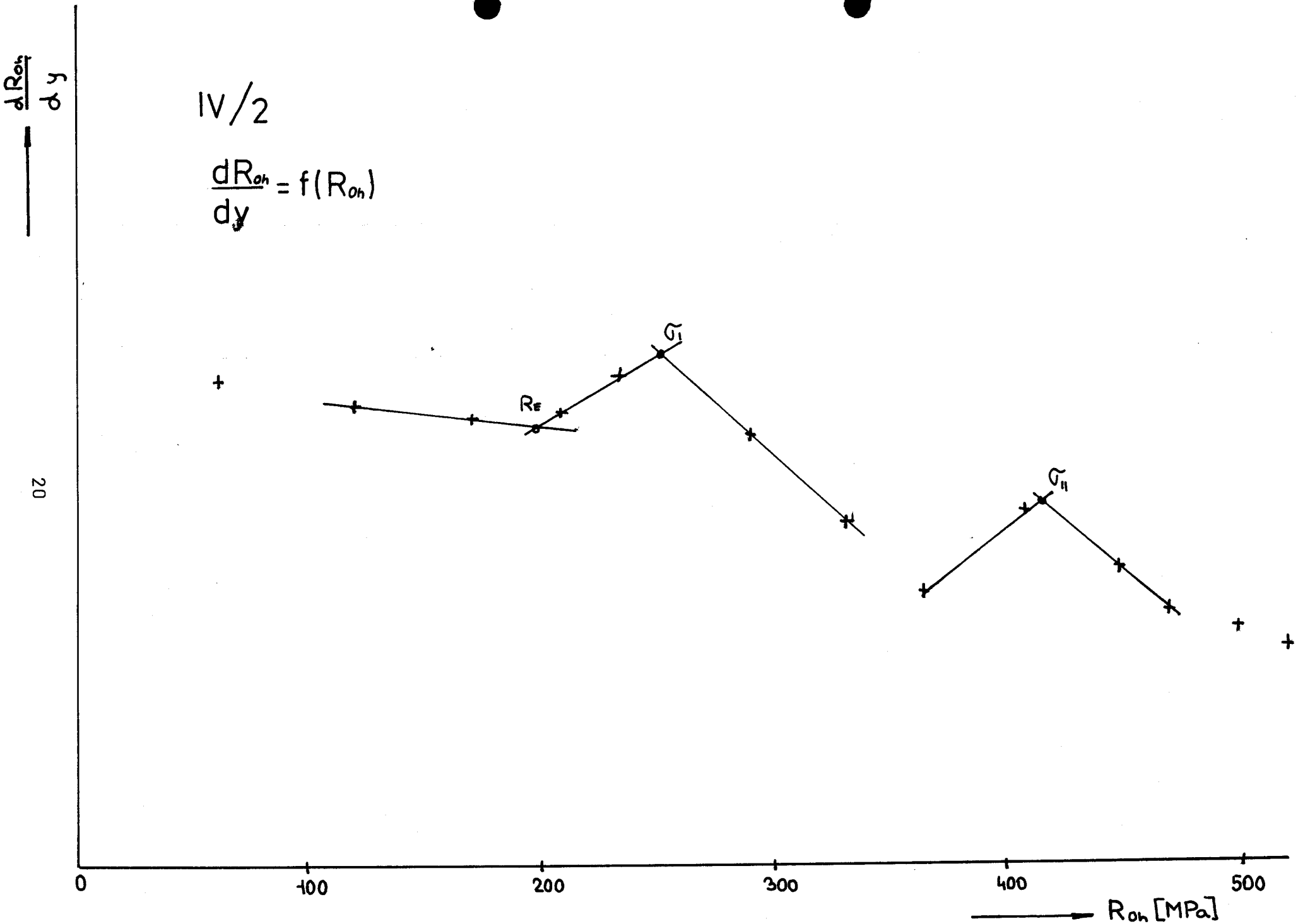

III/2
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]

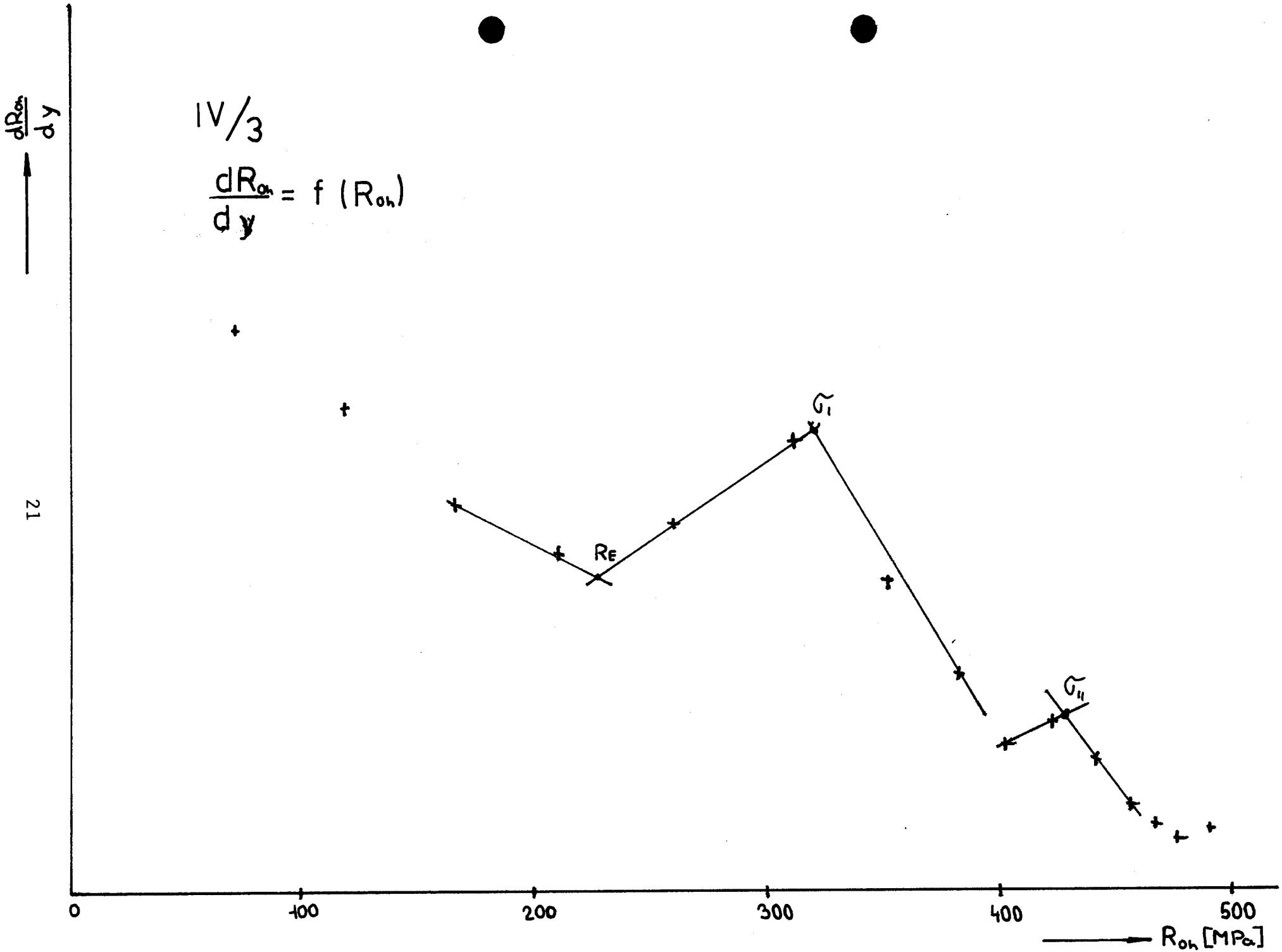

III /3
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]

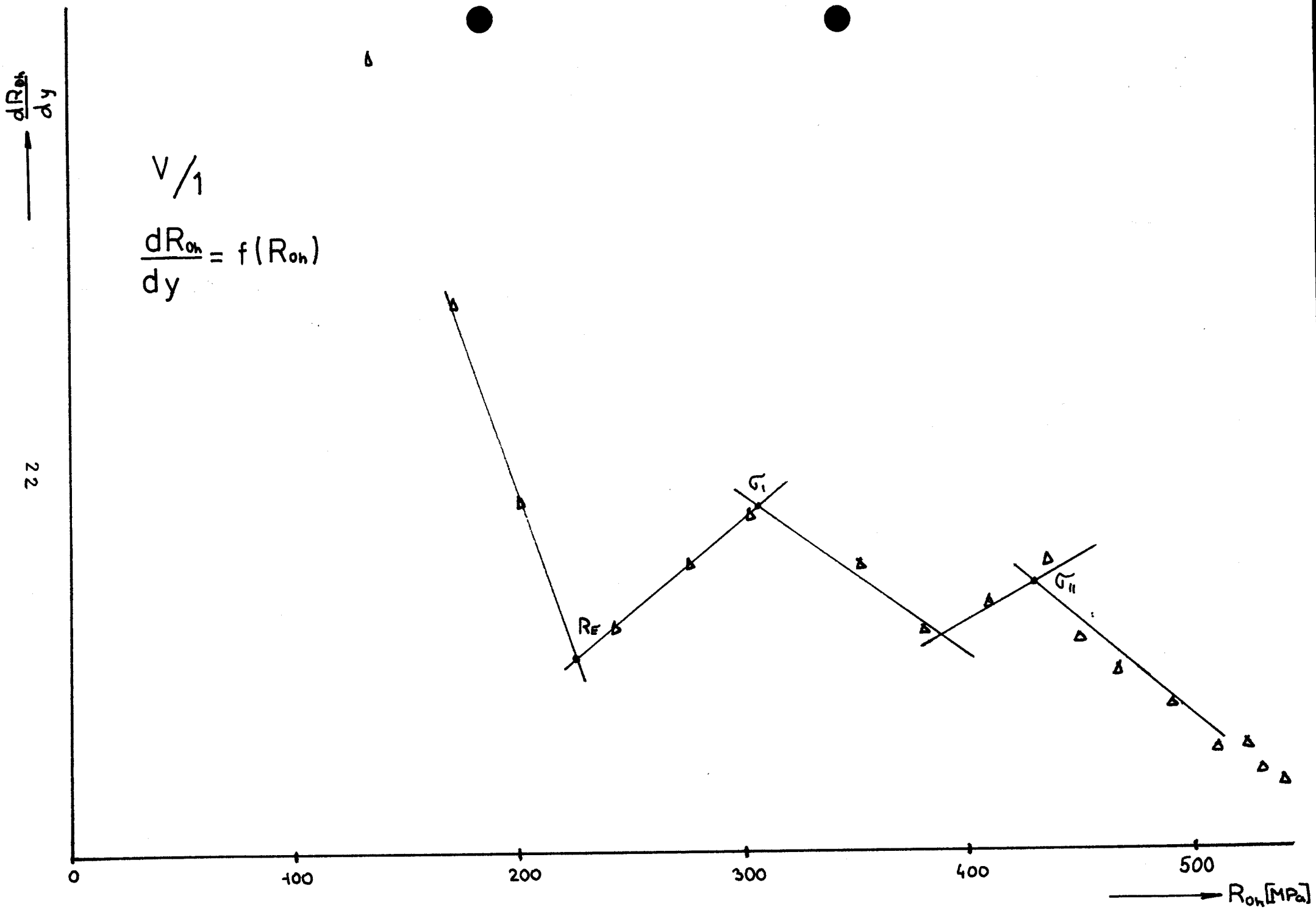

IV/1
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f\ (R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]

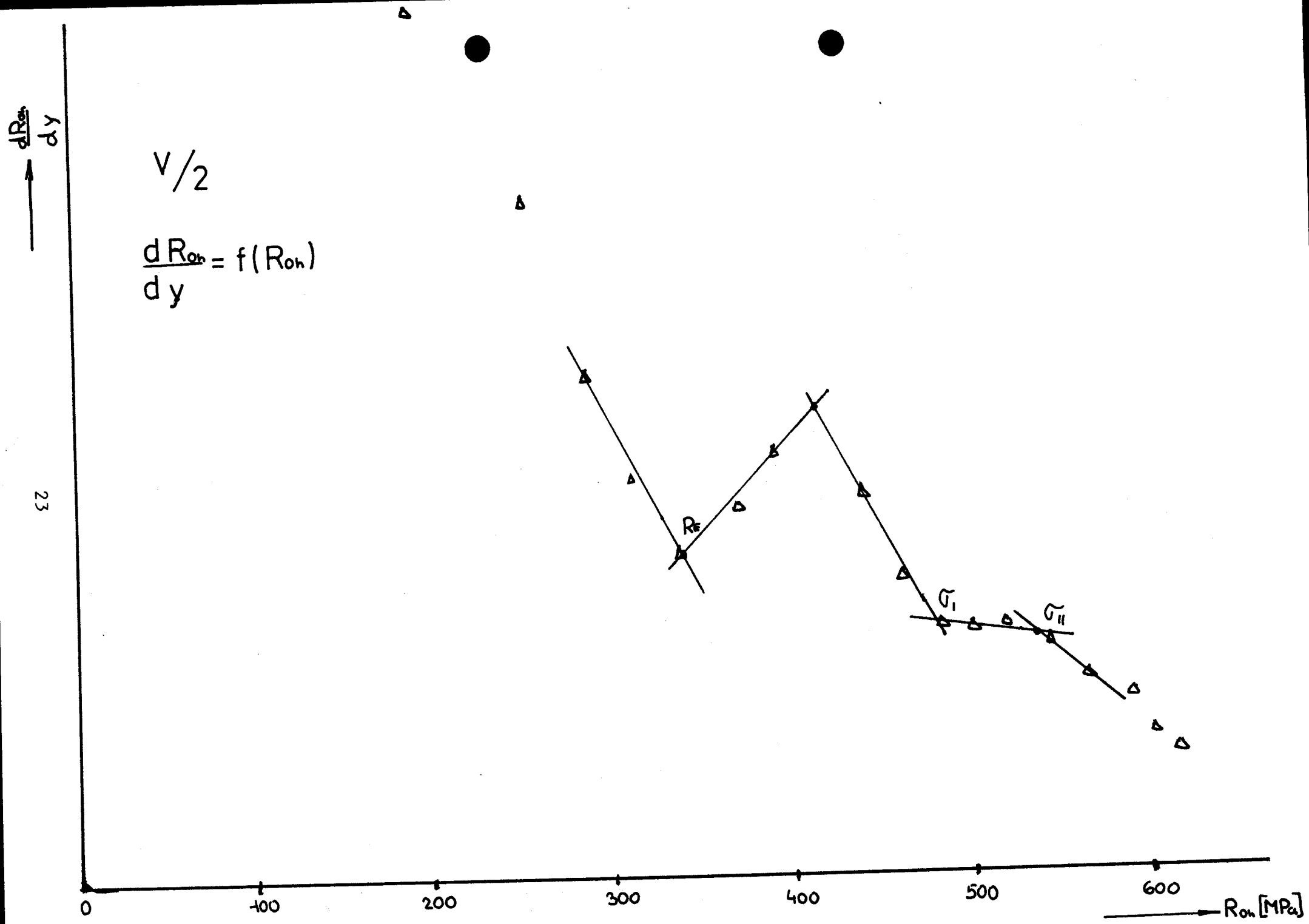
IV/2

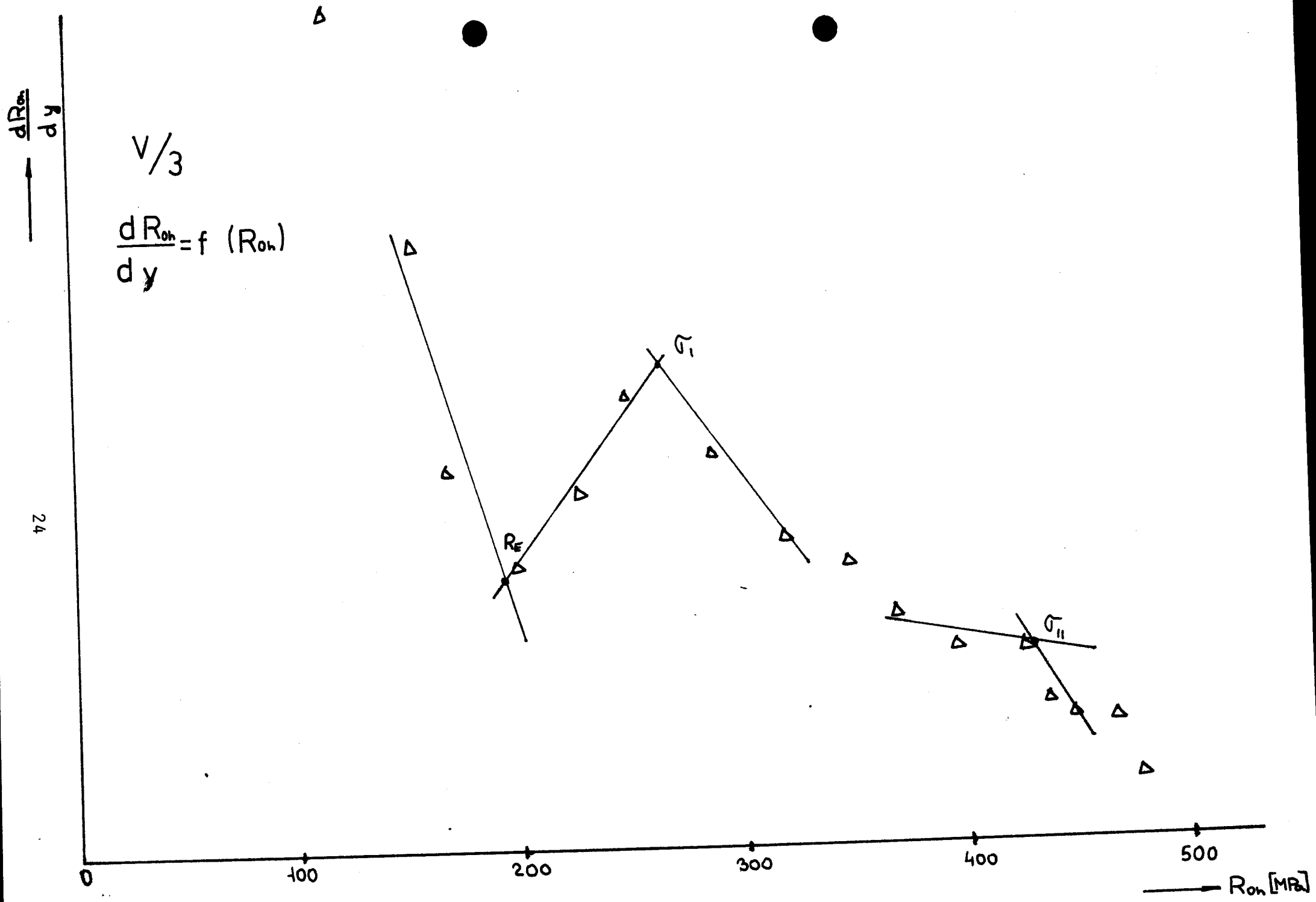
$$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$$




IV/3
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
σ_I
R_E
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]


V/1
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f(R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]

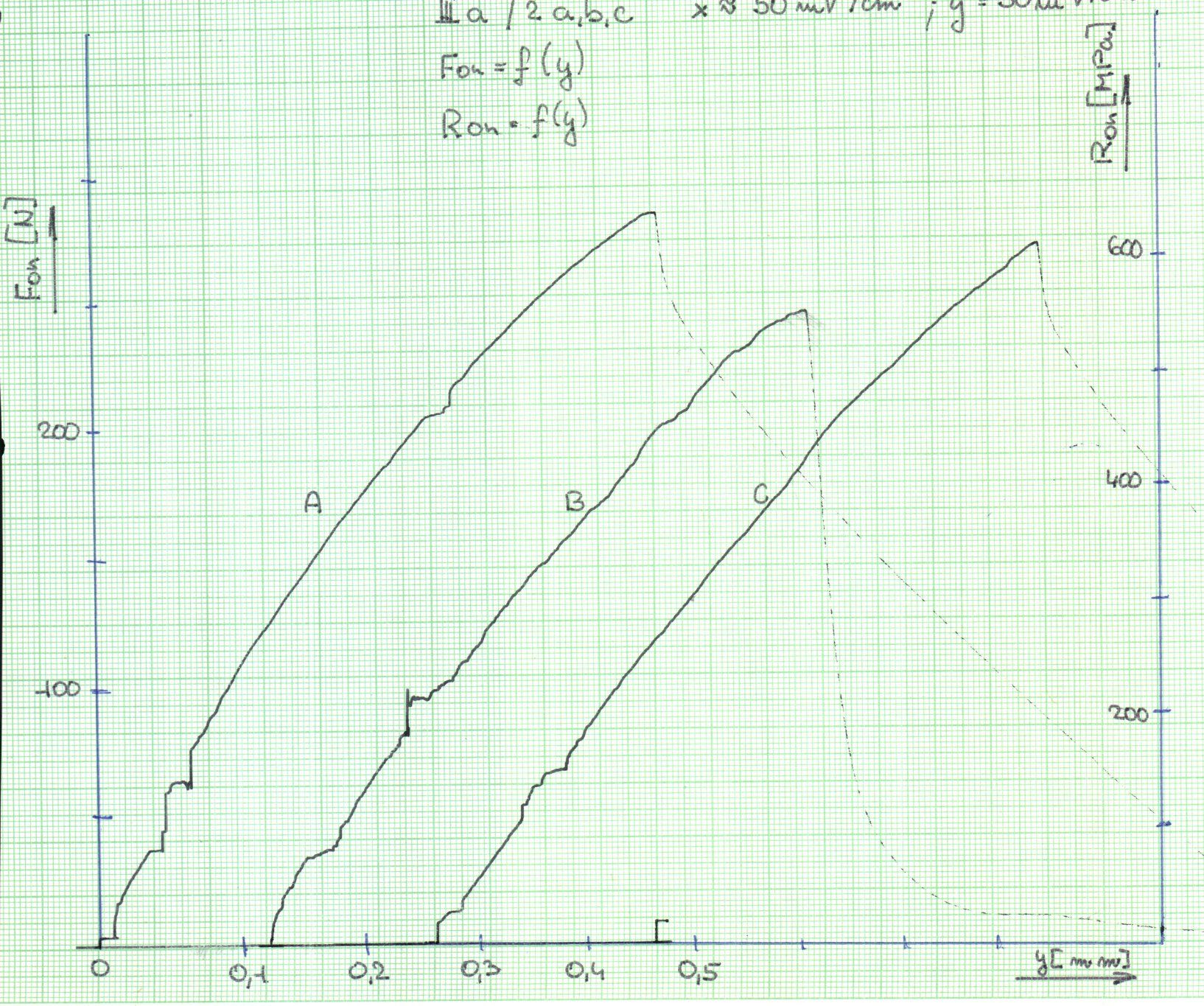

V/2
$\frac{dR_{on}}{dy} = f(R_{on})$
$\frac{dR_{on}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
600
R_{on} [MPa]


V/3
$\frac{dR_{oh}}{dy} = f\ (R_{oh})$
$\frac{dR_{oh}}{dy}$
R_E
σ_I
σ_{II}
0
100
200
300
400
500
R_{oh} [MPa]

III a / 2 a,b,c x ≈ 50 mV/cm ; y = 50 mV/cm

Fon = f(y)

Ron = f(y)



II/3 a,b x ≈ 50 mV/cm ; y ≈ 50 m

IV/3 c y ≈ 100 m

Fon = f(y)

Ron = f(y)

/cm

/cm

II /1 a, b

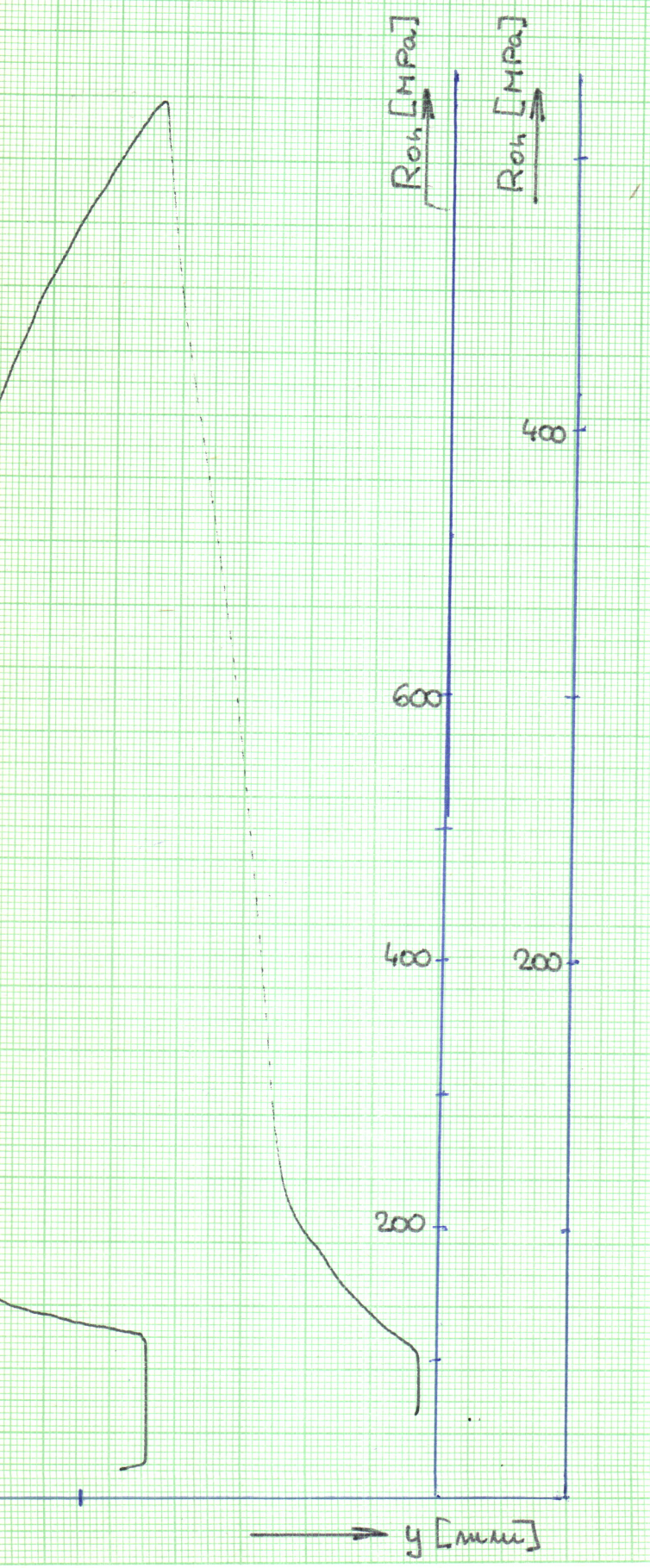
IV / 1 c

$F_{on} = f(y)$

$R_{on} = f(y)$

$x \approx 50$ mV/cm ;

y ≈ 100 mV/cm



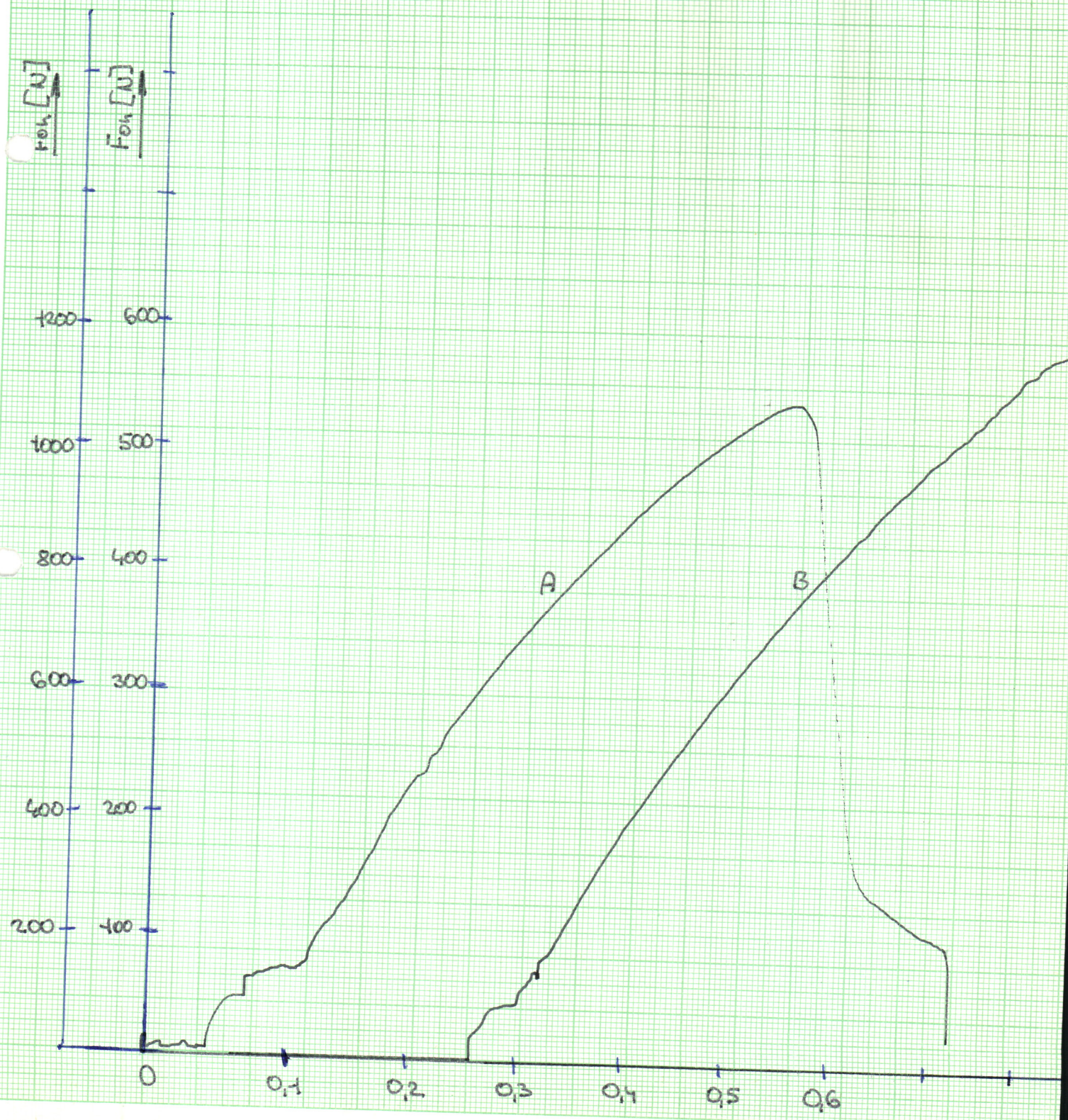
I / 1 a, b

V / 1 c

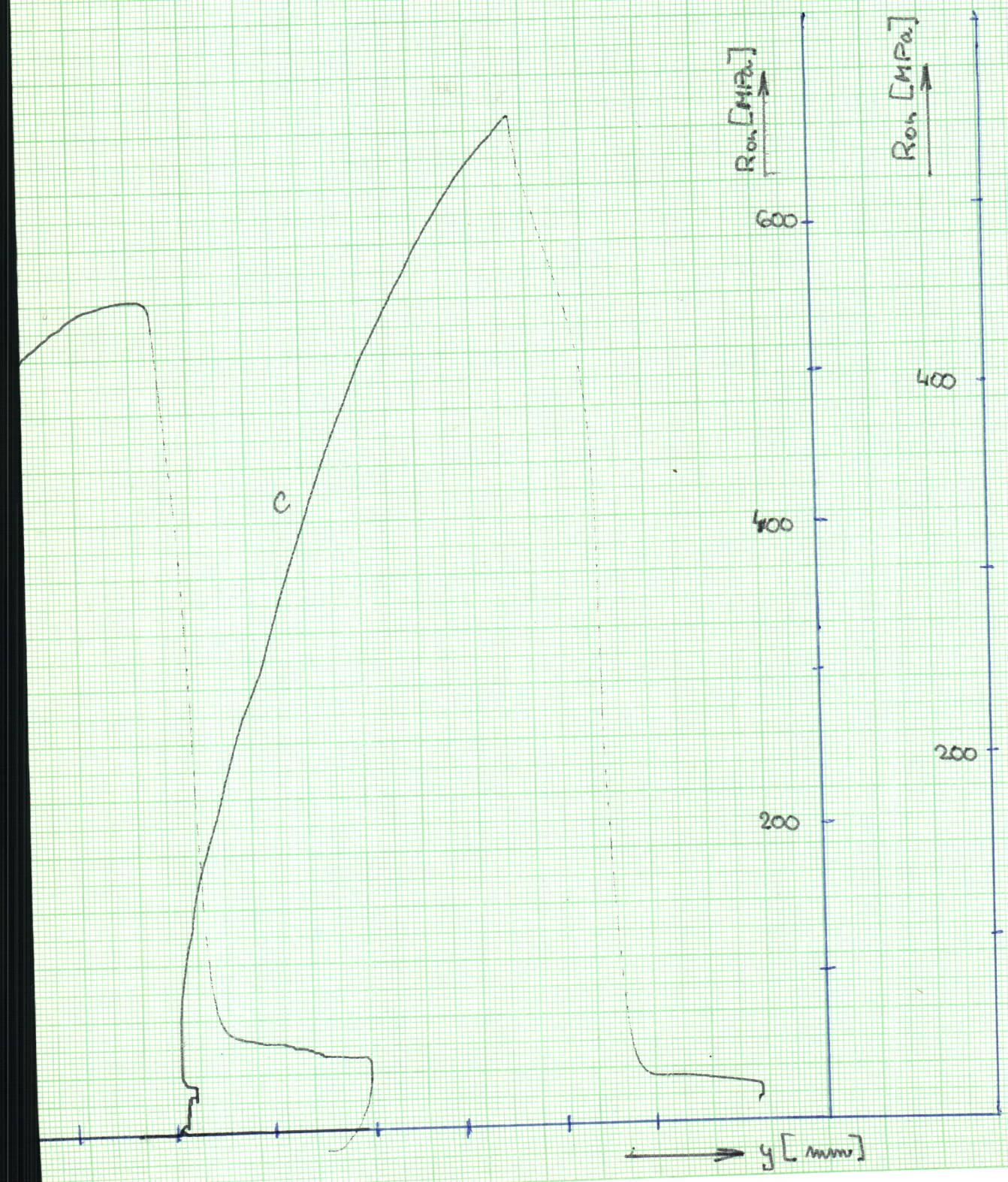
$F_{on} = f(y)$

$R_{on} = f(y)$

x ≈ 50 mV / c



m ; y ≈ 100 mV/cm
y ≈ 200 mV/cm

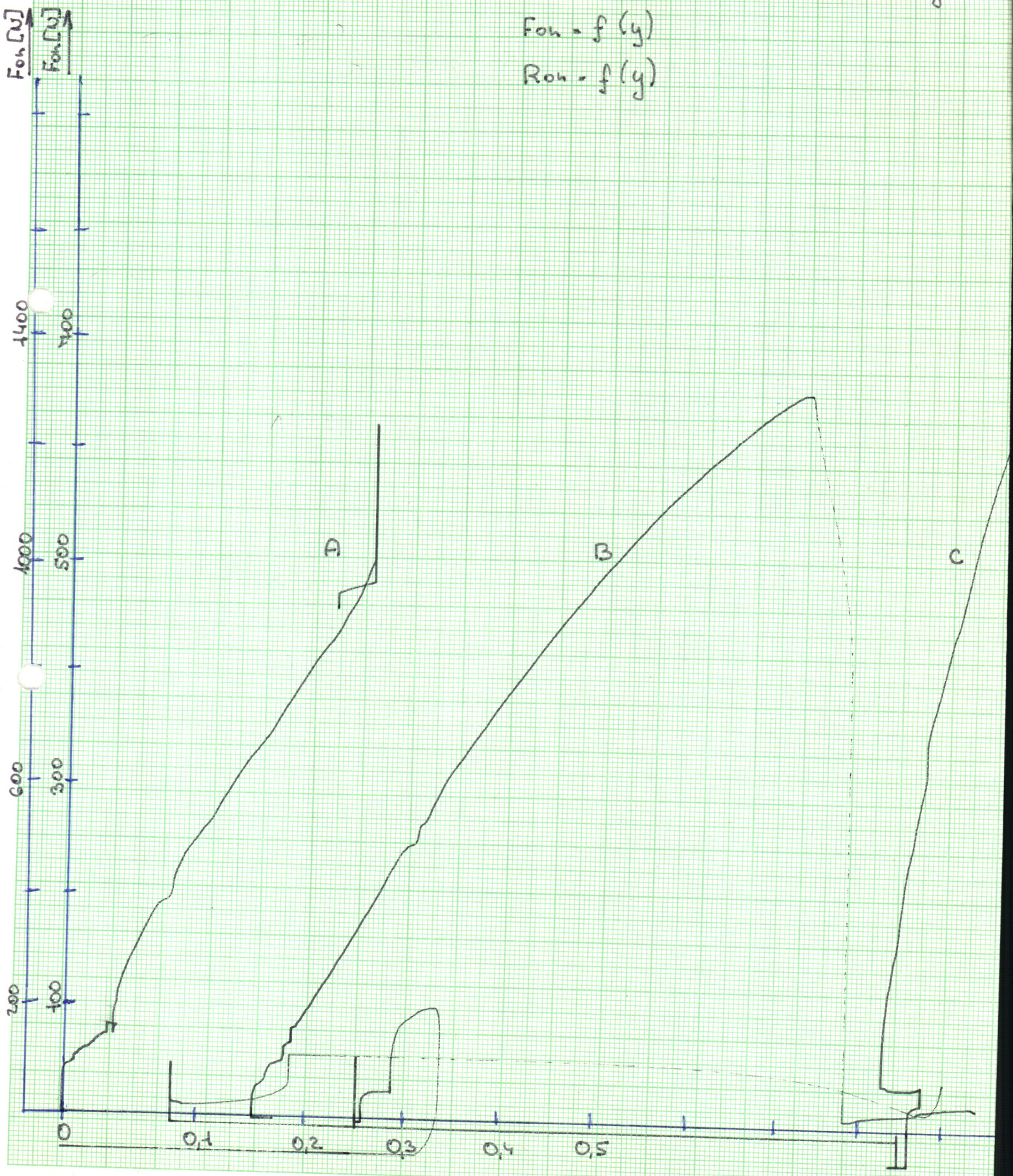


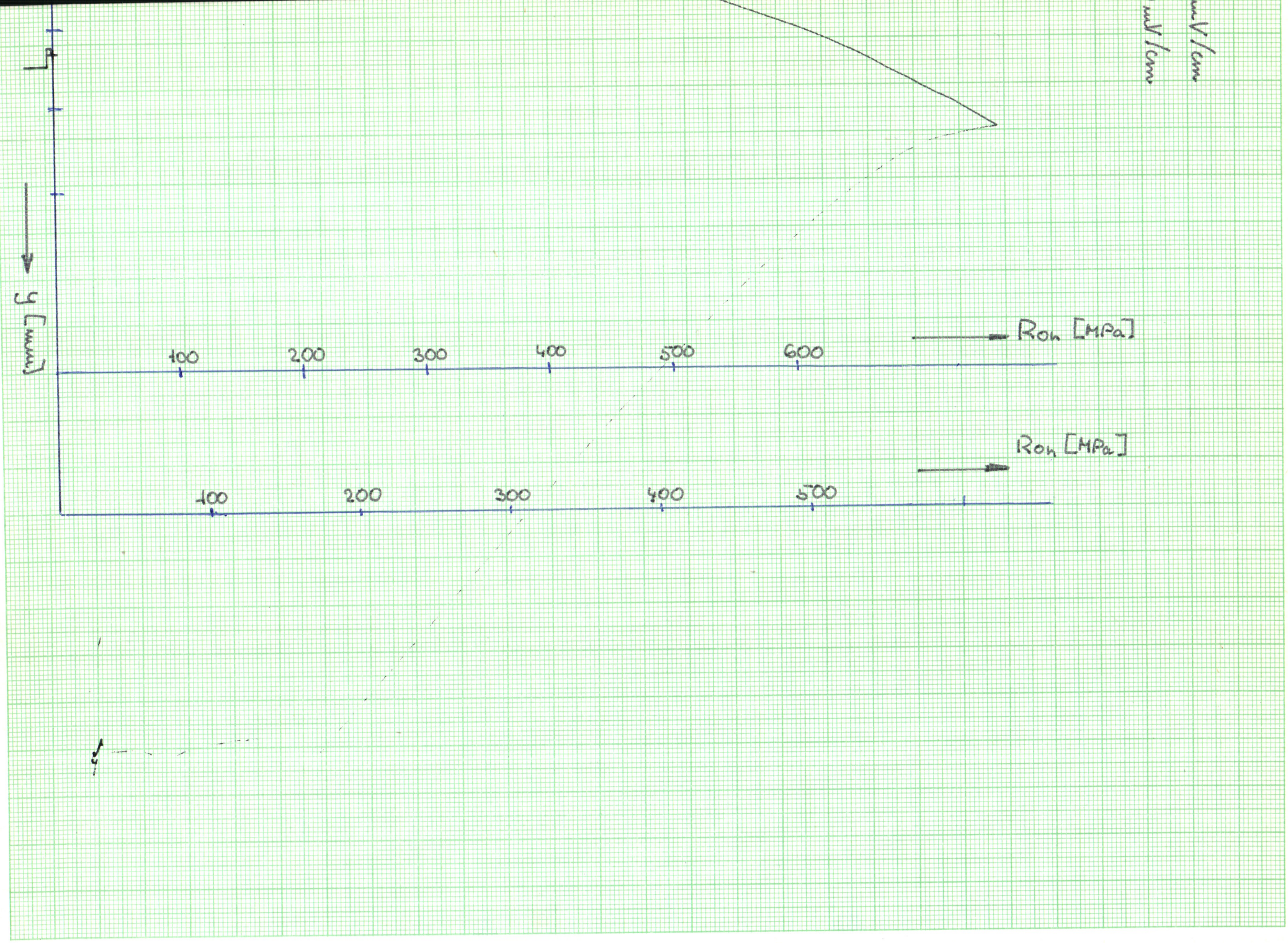
I/2a,b x ≈ 50 mV/cm ; y ≈ 100

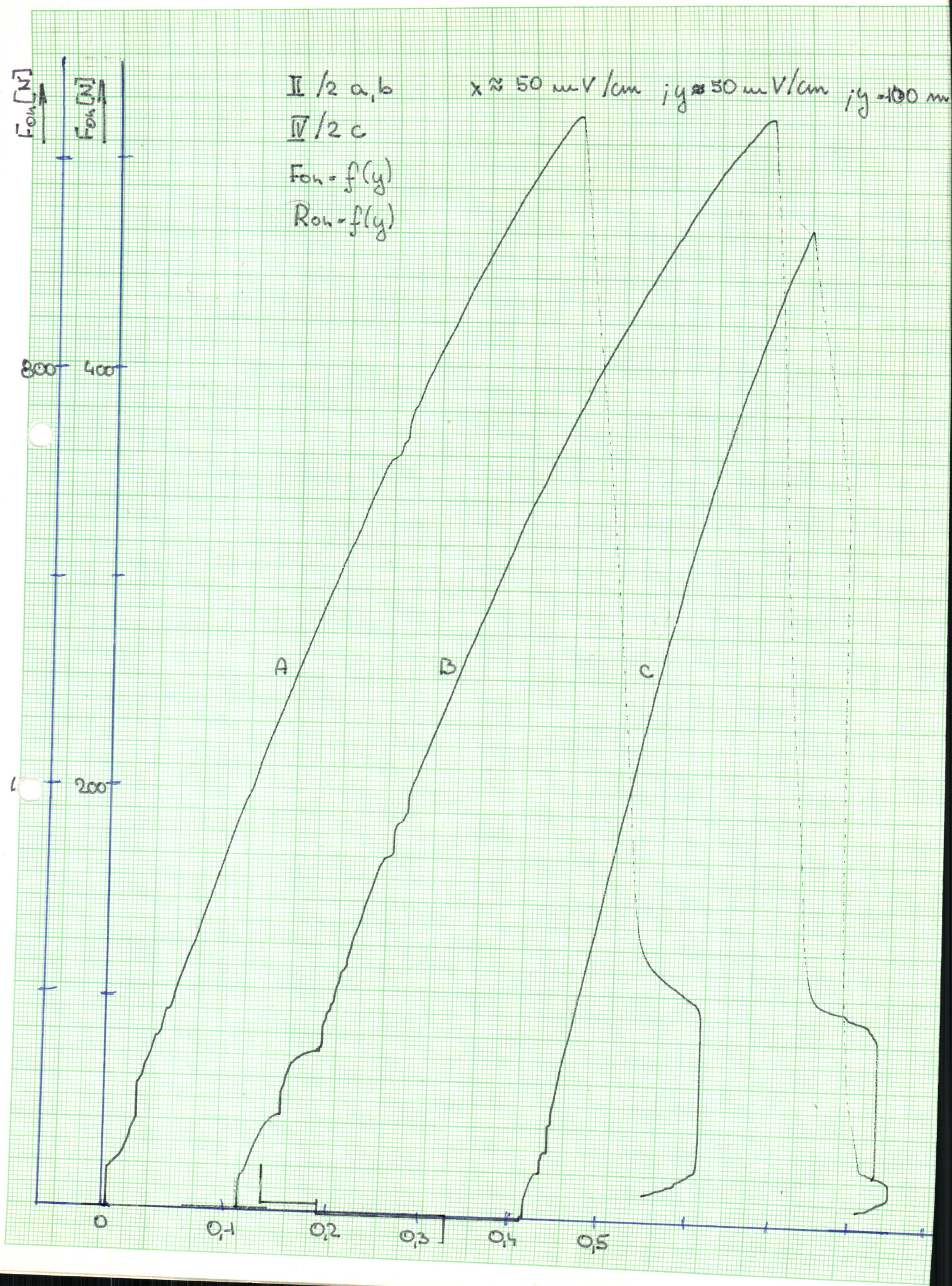
V/2c y ≈ 20

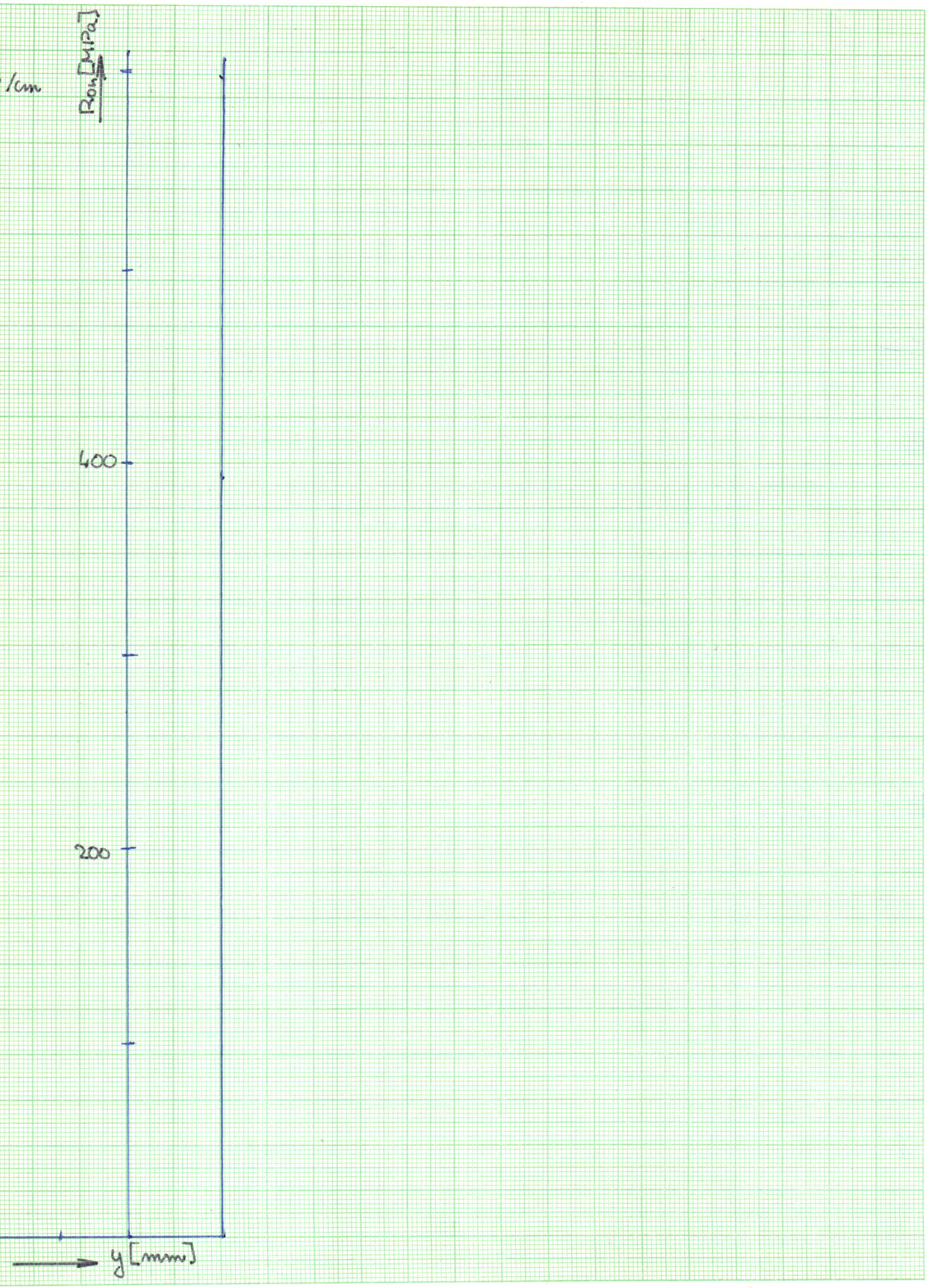
Fon = f(y)

Ron = f(y)




mV/cm
mV/cm
y [mm]
100
200
300
400
500
600
Ron [MPa]
100
200
300
400
500
Ron [MPa]

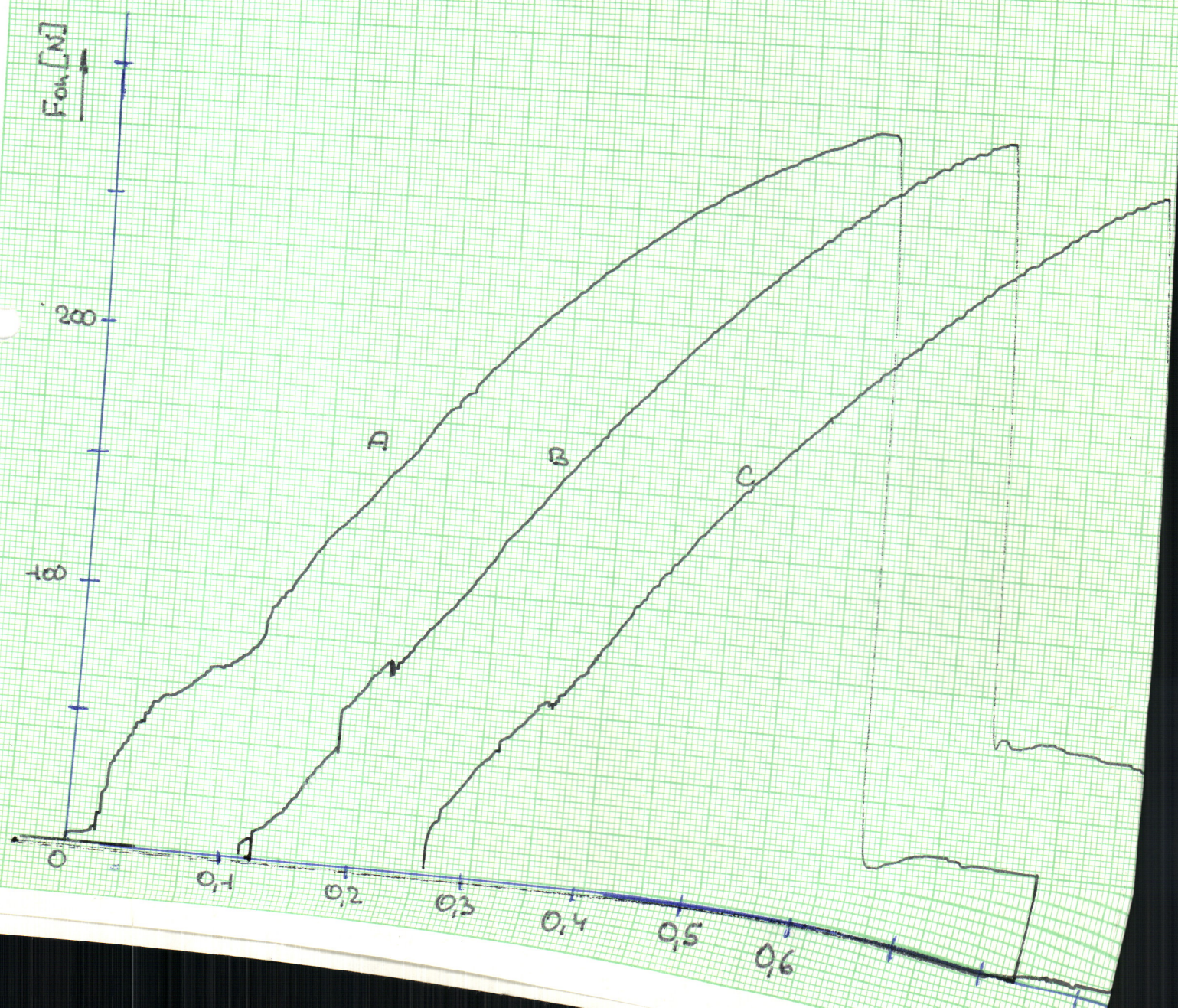

II /2 a, b
IV /2 c
Fon = f(y)
Ron = f(y)
x ≈ 50 mV/cm ; y ≈ 50 mV/cm ; y = 100 mV
Fon [N]
Fon [N]
800
400
200
A
B
C
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5


/cm
Rou [MPa]
400
200
y [mm]

IIIa/ 1a, b, c x ≈ 50 mV/cm ; y ≈ 50 mV

$F_{on} = f(y)$

$R_{on} = f(y)$



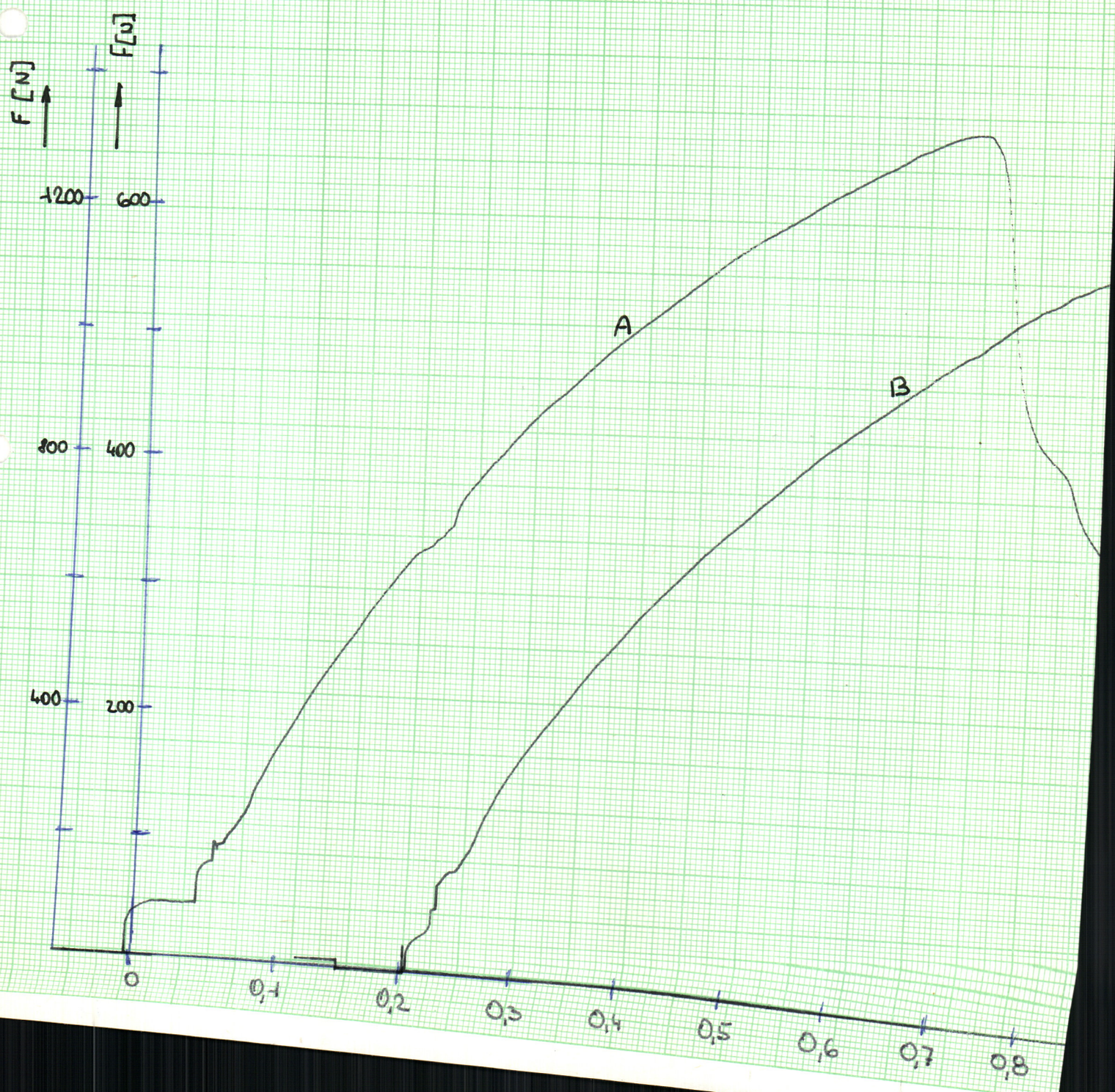
/cm

I / 3 a, b x ≈ 50 mV/cm ; y ≈

V / 3 c y ≈

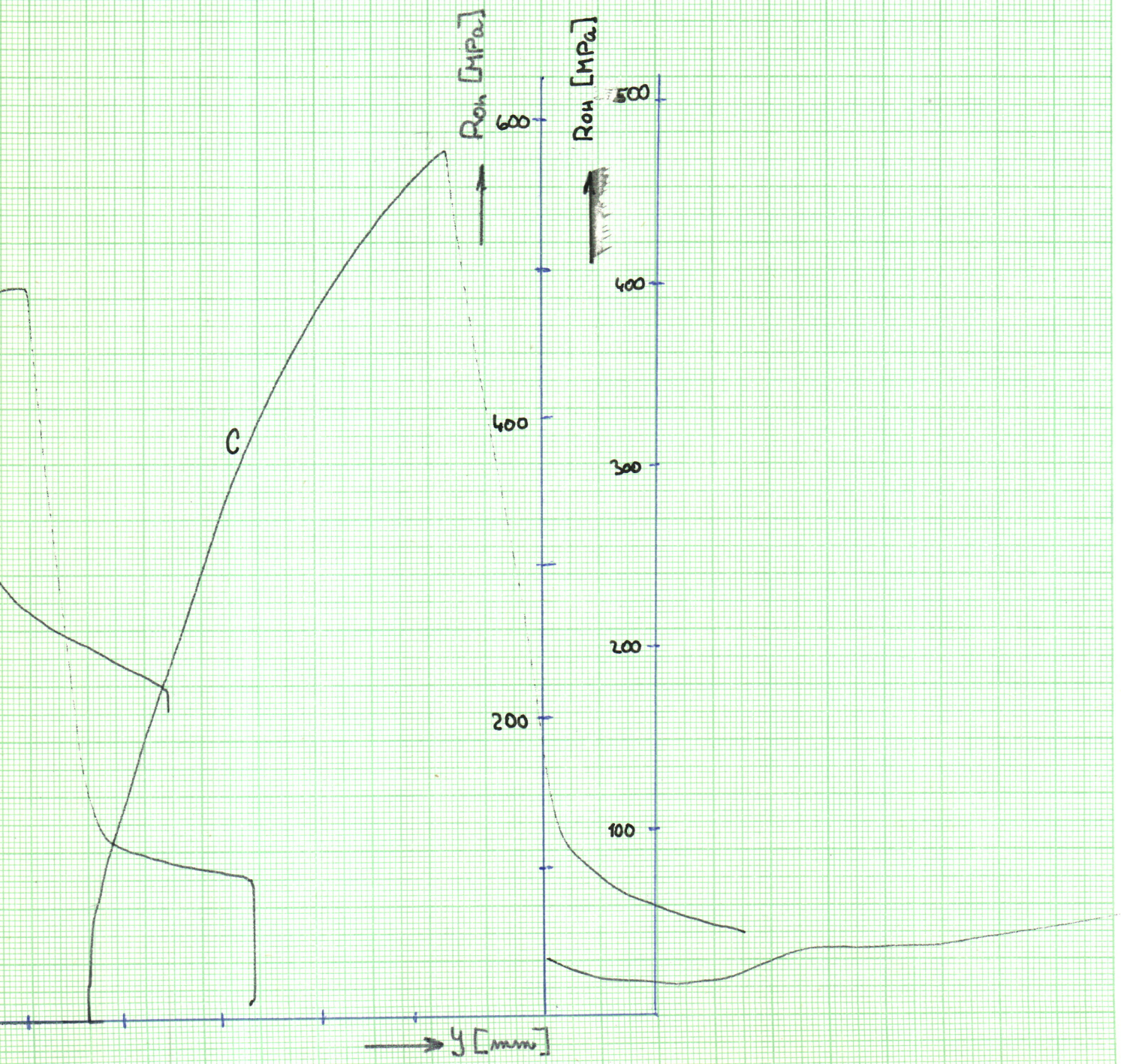
$F_{on} = f(y)$

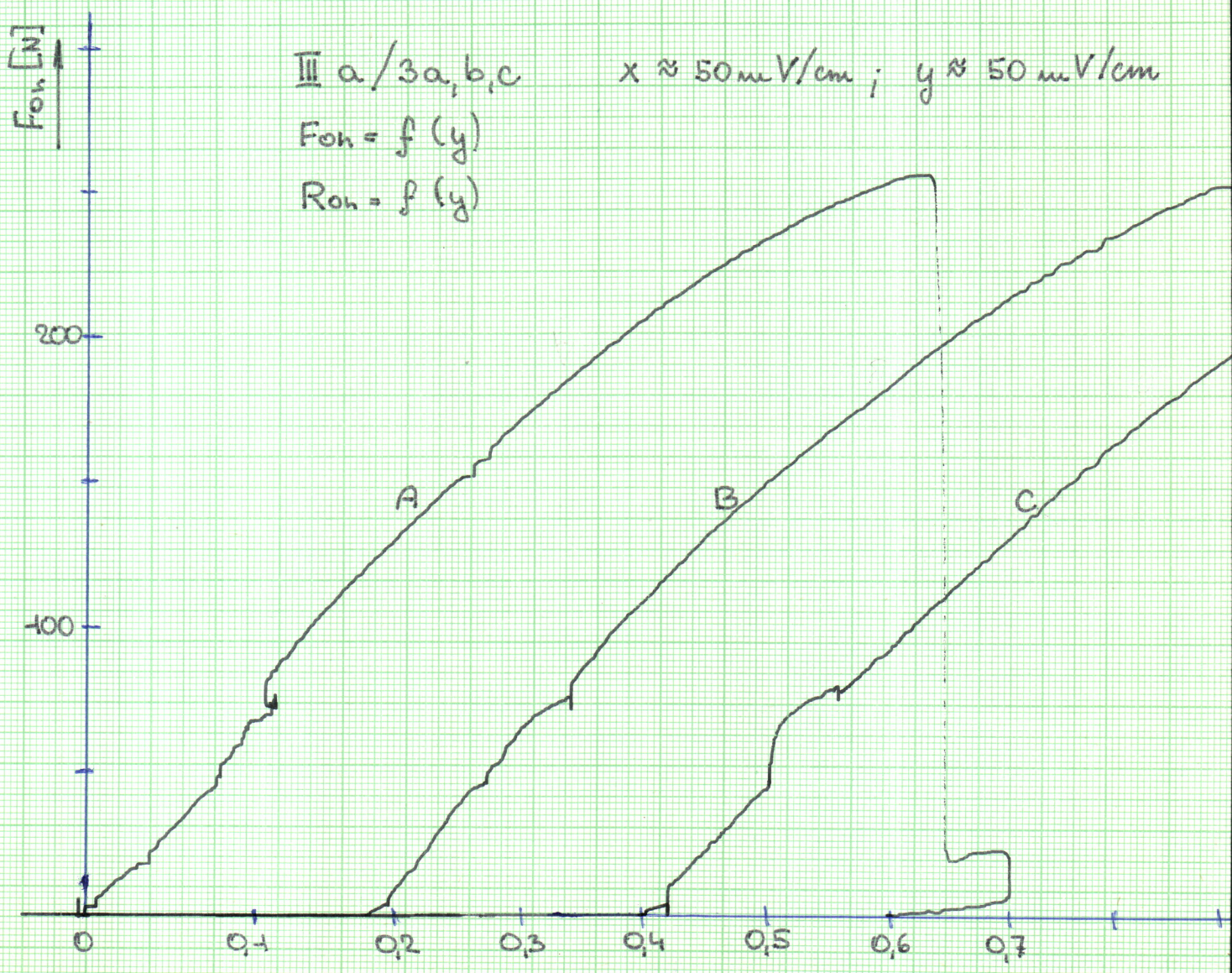
$R_{on} = f(y)$



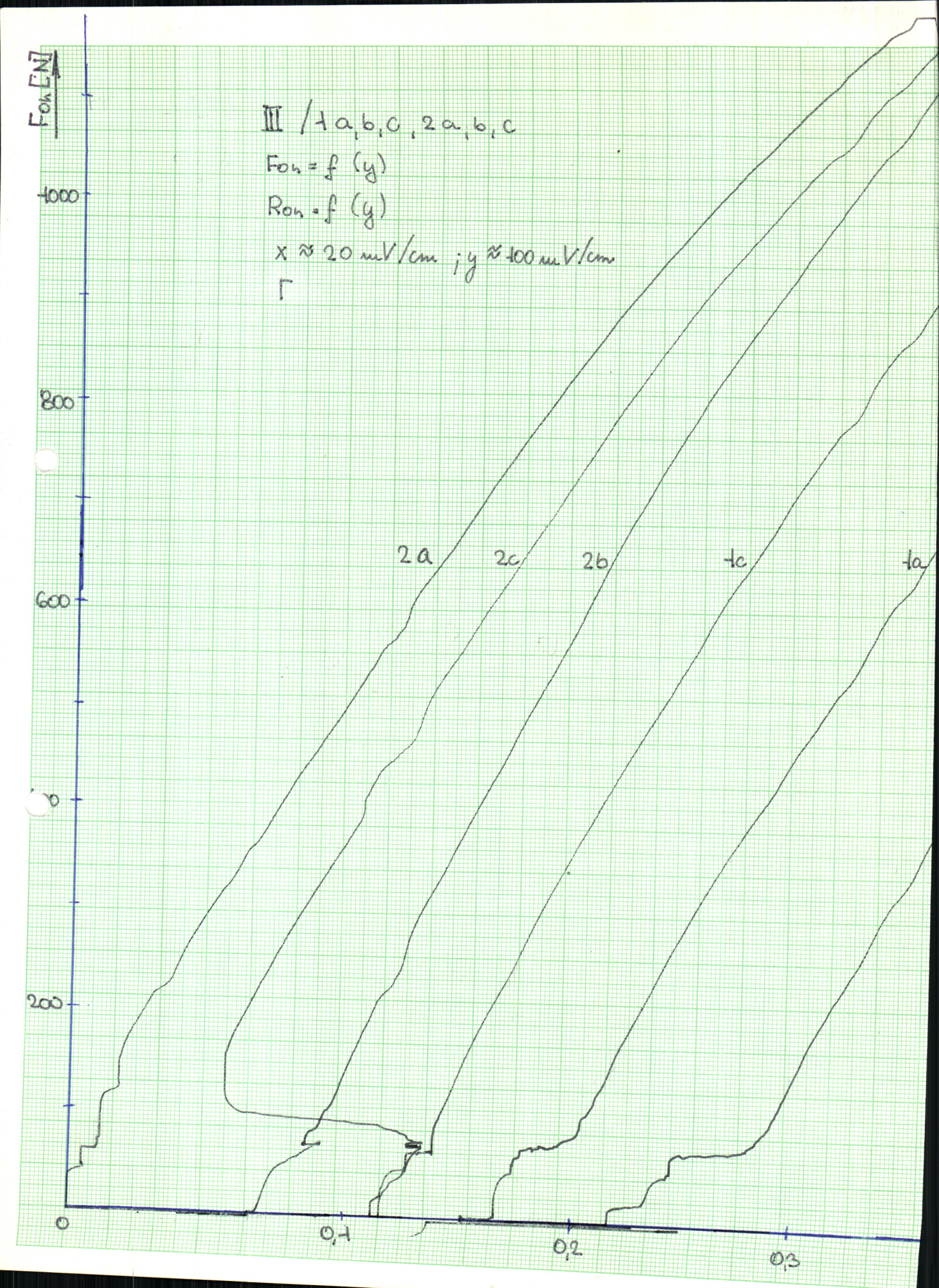
100 mV/cm

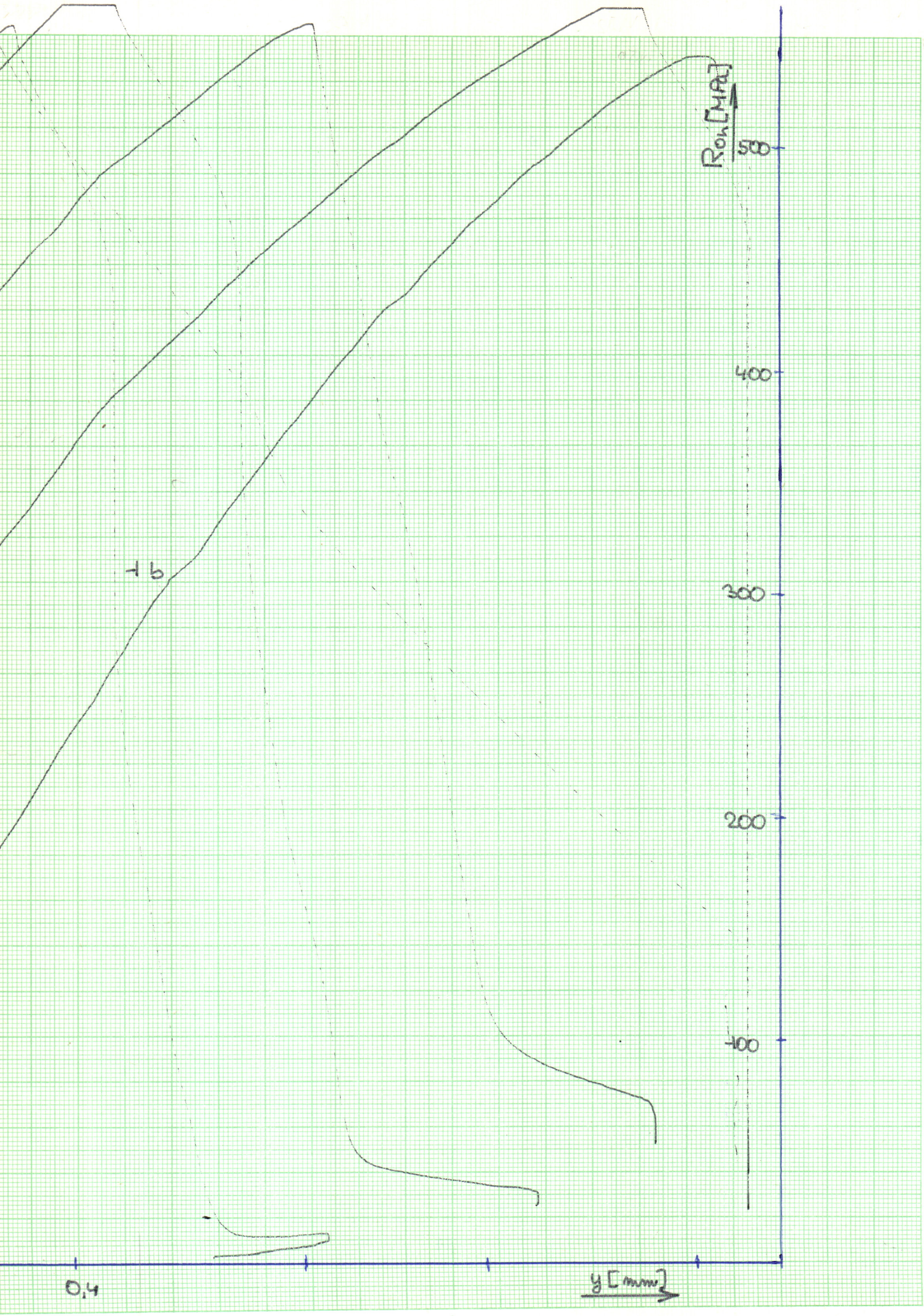
200 mV/cm

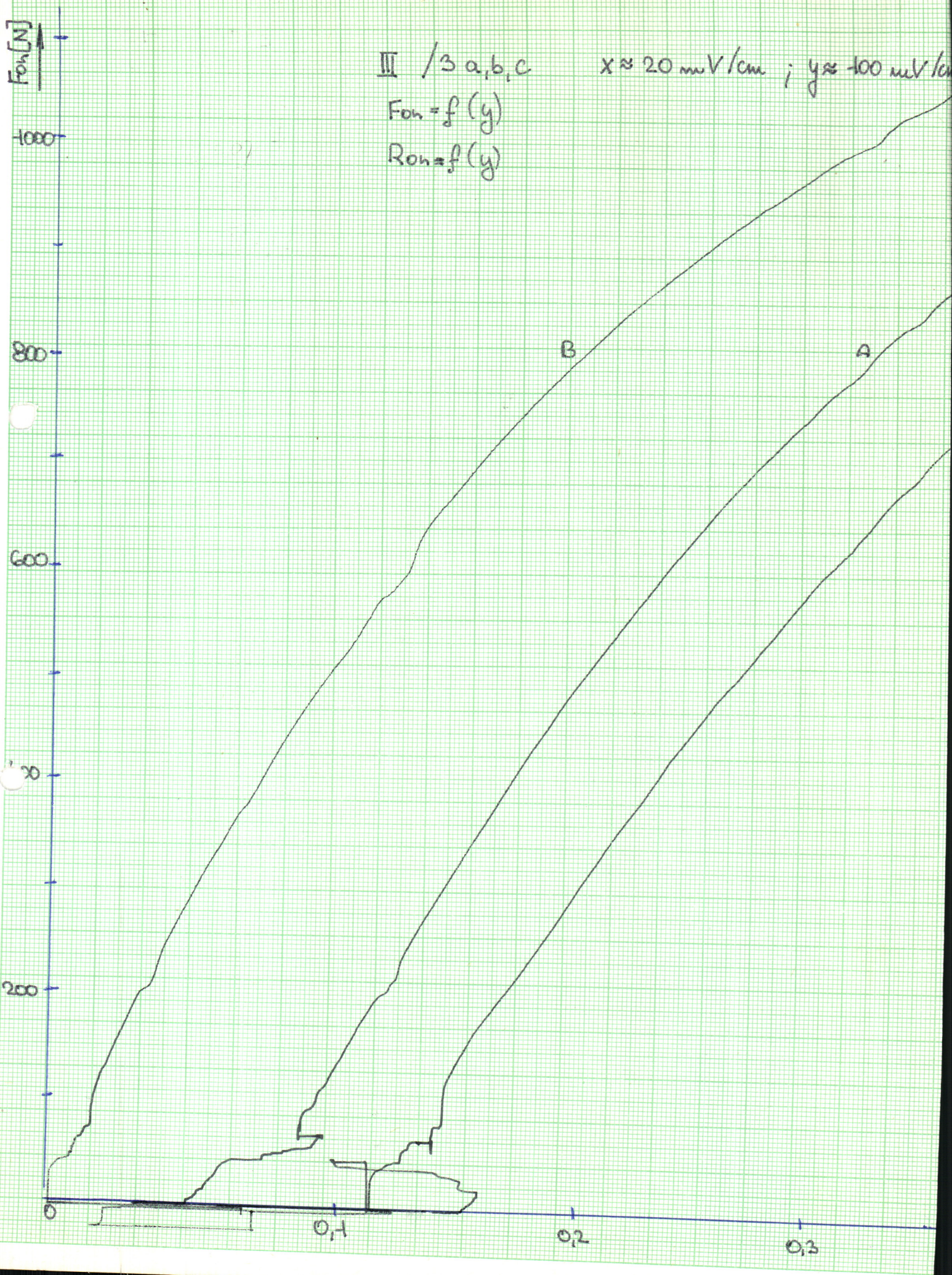


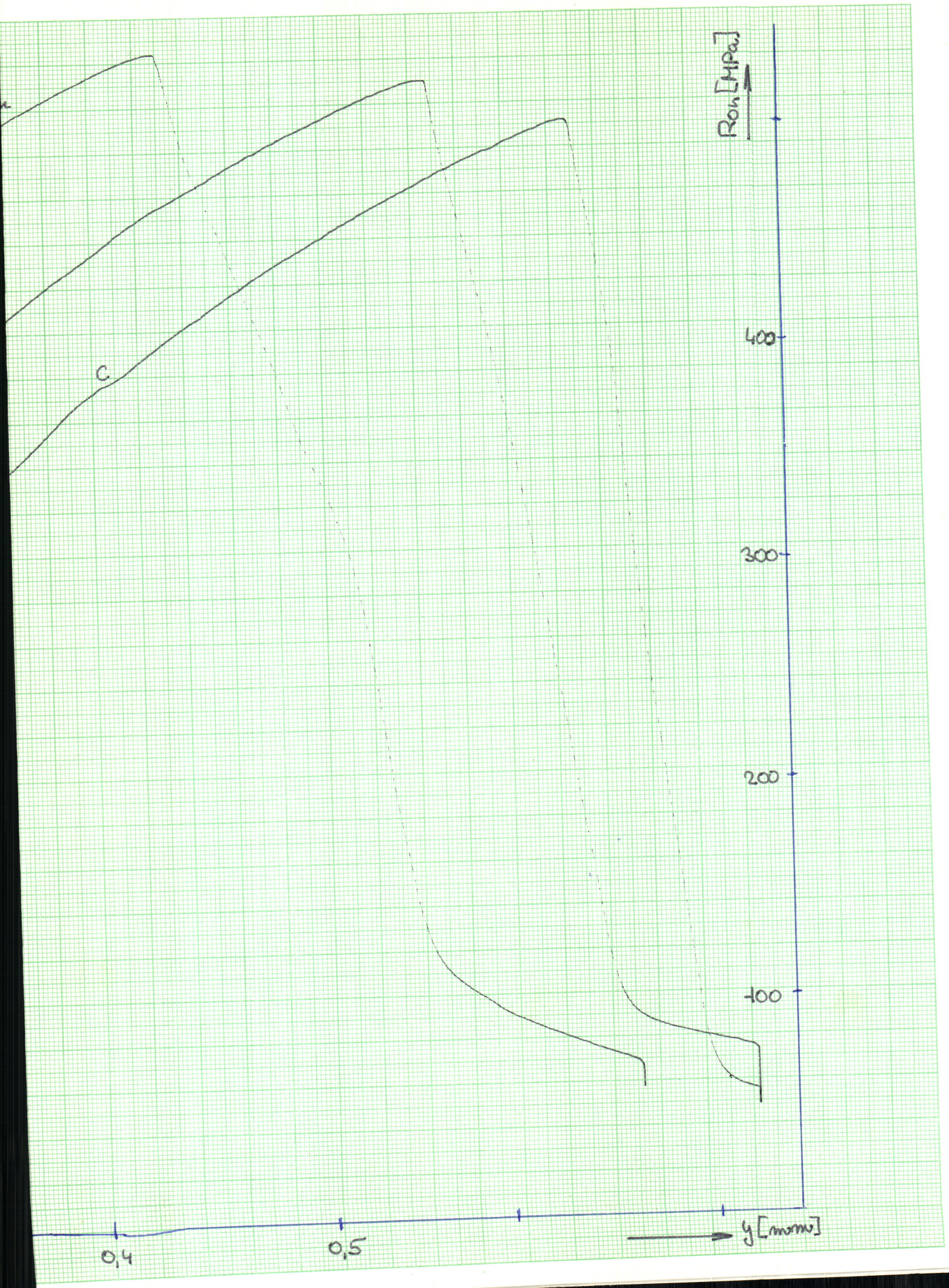

III a/3a,b,c
x ≈ 50 mV/cm ; y ≈ 50 mV/cm
Fon = f (y)
Ron = f (y)
Fon [N]
200
100
A
B
C
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7

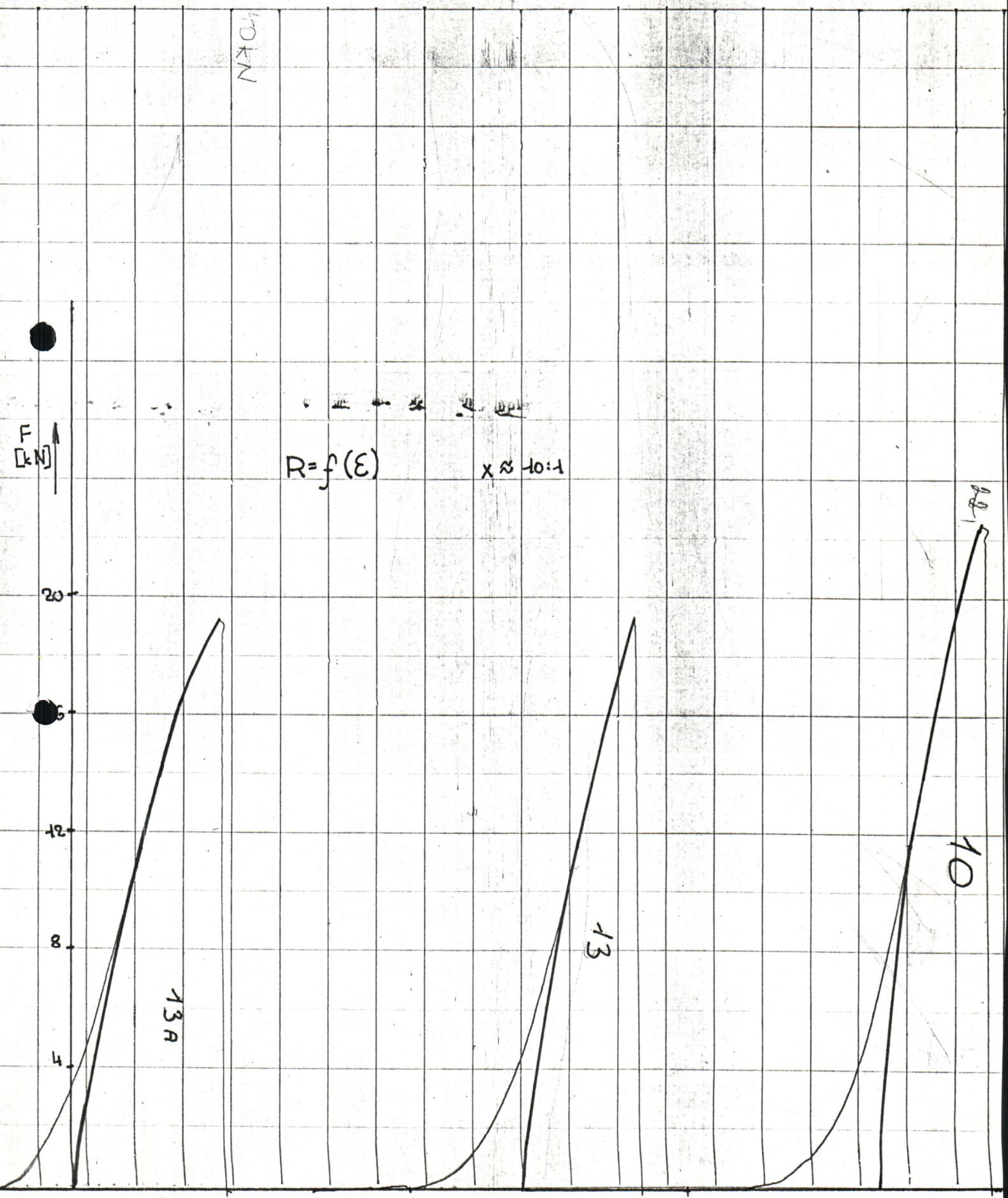
R_{0h} [MPa]
400
200
y [mm]

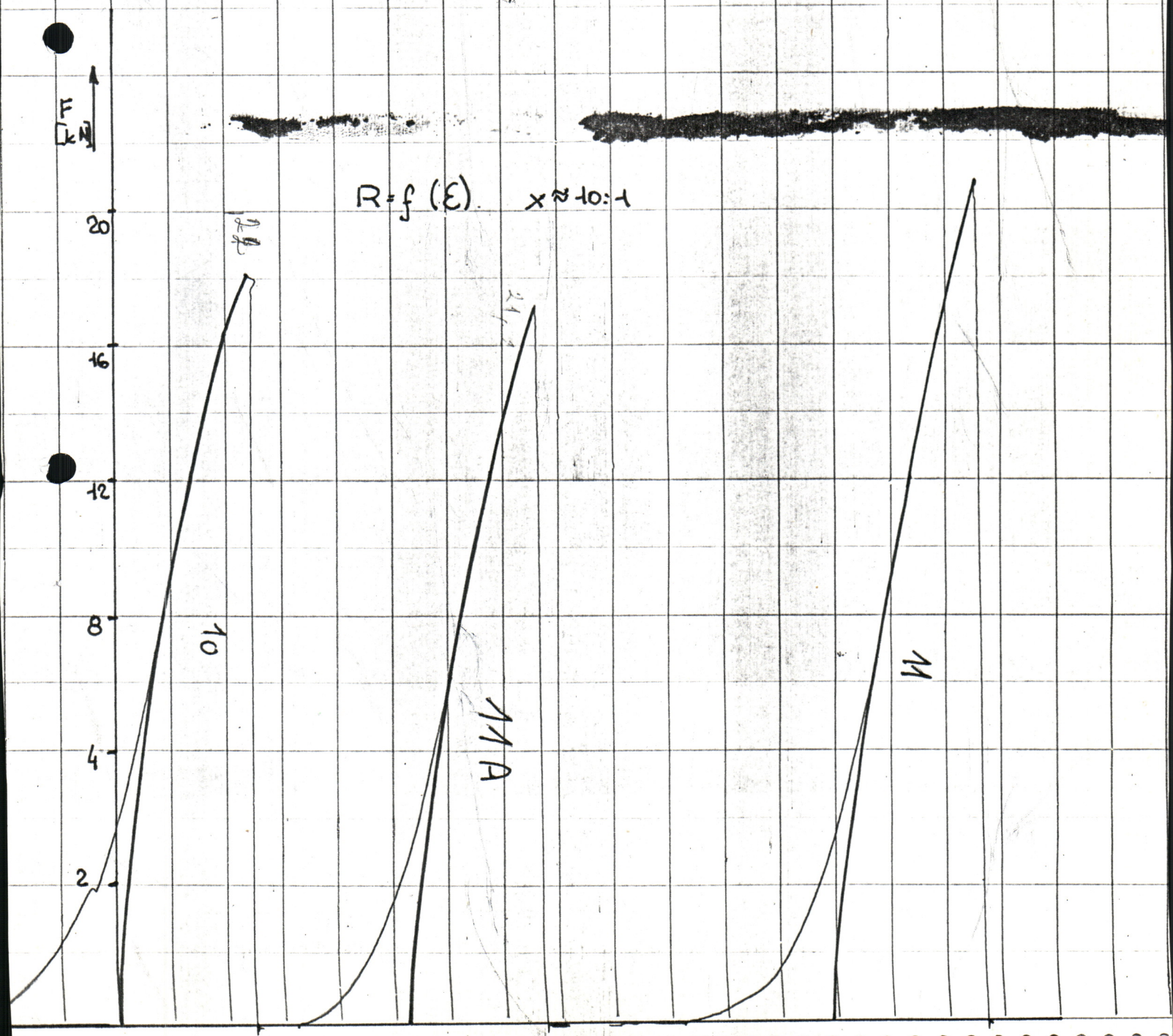

Fon [N]
1000
800
600
200
0
0,1
0,2
0,3
III / 1a, b, c, 2a, b, c
Fon = f (y)
Ron = f (y)
x ≈ 20 mV/cm ; y ≈ 100 mV/cm
2a
2c
2b
1c
1a


R_{on} [MΩ]
500
400
300
200
100
1 b
0,4
y [mm]


Fon [N]
1000
800
600
200
0
0,1
0,2
0,3
B
A
III /3 a,b,c
x ≈ 20 mV/cm ; y ≈ 100 mV/cm
Fon = f (y)
Ron = f (y)


Ron [MPa]
400
300
200
100
C
0,4
0,5
y [mm]


F
[kN]
20
16
12
8
4
R=f(ε)
x ≈ 10:1
13A
13
10


F
[kN]
20
16
12
8
4
2
R = f (ε)
x ≈ 10:1
10
11A
11