

## MINISTERUL EDUCAȚIEI UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România www.upg-ploiesti.ro Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

# TEZĂ DE DOCTORAT CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA REZISTENȚEI MECANICE A CONDUCTELOR DE POLIETIENĂ

## RESEARCH ON THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE STRENGTH OF POLYETHYLENE PIPING

Autor: Ing. Ioana-Daniela MANU

**Conducător științific: Prof. univ. habil dr. ing. Marius Gabriel PETRESCU** 



## MINISTERUL EDUCAȚIEI UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România www.upg-ploiesti.ro Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

# TEZĂ DE DOCTORAT CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA REZISTENȚEI MECANICE A CONDUCTELOR DE POLIETILENĂ

## STUDIES ABOUT THE INFLUENCE OF DEFECTS ON STRENGTH OF POLYETHYLENE PIPELINES

## Autor: Ing. Ioana-Daniela MANU

Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Marius Gabriel PETRESCU

Nr. Decizie 516 din 28.06.2024

## Comisia de doctorat:

Președinte	Prof. univ. habil. dr. ing.	de la	Universitatea Petrol-Gaze din
	Mihail MINESCU		Ploiești
Conducător	Prof. univ. habil. dr. ing.	de la	Universitatea Petrol-Gaze din
științific	Marius Gabriel PETRESCU		Ploiești
<b>Referent</b> oficial	Prof. univ. dr. ing. DHC Anton	de la	Universitatea Națională de Știință
	HADĂR		și Tehnologie POLITEHNICA
			din București
<b>Referent</b> oficial	Prof. univ. habil. dr. ing. Ioan	de la	Universitatea Transilvania din
	Călin ROȘCA		Brașov
<b>Referent</b> oficial	Prof. univ. habil. dr. ing.	de la	Universitatea Petrol-Gaze din
	Răzvan George RÎPEANU		Ploiești

			Pg. teză	Pg. rezumat
	INTF	RODUCERE	5	5
	ABR	EVIERI	8	6
	INDE	EX FIGURI	13	11
	INDE	EX TABELE	19	14
	ABS	ГКАСТ	21	15
1.	ASPI	ECTE GENERALE PRIVIND SISTEMELE DE CONDUCTE DIN		
	PEH	D UTILIZATE LA TRANSPORTUL ȘI DISTRIBUȚIA APEI	24	17
	1.1.	Importanța și actualitatea subiectului tezei de doctorat	24	17
	1.2.	Avantajele utilizării conductelor din polietilenă în rețelele de alimentare		
		cu apă	26	18
	1.3.	Solicitări ale conductelor utilizate la alimentarea cu apă și elemente de		4.0
		calcul specifice	27	18
		1.3.1. Solicitari manifestate in timpul procesului de fabricație	27	18
		1.3.2. Solicitari manifestate in timpul ambalarii, manipularii,	27	10
		transportulul și depozitarii	27	18
		1.5.5. Solicitari manifestate in timpul instalarii, reabilitarii sau	20	10
		1.3.4 Solicitări manifestate în țimpul exploatării	20	19
	14	Concluzii	29 34	21
2	$\mathbf{A}\mathbf{N}\mathbf{A}$	LIZA CRITICĂ A MATERIALELOR ȘI TEHNOLOGIILOR DE	54	<i>L</i> 1
	EXE	CUTIE UTILIZATE LA FABRICAREA TEVILOR DIN		
	POL	IETILENĂ	35	22
	2.1.	Obtinerea polietilenei – repere istorice si tehnice	37	22
		2.1.1. Caracteristicile mecanice ale polietilenei	41	23
		2.1.2. Particularitățile comportării la oboșeală a poliețilenei	47	24
		2.1.3. Evaluarea caracteristicilor de fluaj ale polietilenei	49	26
	2.2.	Considerații teoretice privind tehnologiile de fabricare ale țevilor din		
		polietilenă	56	27
	2.3.	Concluzii	58	28
3.	CAR	ACTERISTICILE CONSTRUCTIVE, FUNCȚIONALE ȘI		
	TEH	NOLOGICE ALE TUBULATURII CONDUCTELOR DIN		
	POL	IETILENA	60	29
	3.1.	Clasificarea conductelor sub presiune	60	29
	3.2.	Elementele de tubulatură ale conductelor din polietilenă	62	30
		3.2.1. Jevi utilizate la realizarea conductelor din polietilena	62	30
		3.2.2. Fitinguri utilizate la realizarea conductelor din polietilena	63	30
		3.2.5. Armaturi utilizate la realizarea conductelor din policitica din	00	32
		5.2.4. Elemente auxinare utilizate la realizatea conducteroi utili polietilenă	67	22
		3.2.5 Componente secundare ale conductelor din polietilenă	69	32
	33	Caracteristicile constructive ale conductelor din polietilenă	70	32
	5.5.	3.3.1 Dimensiuni constructive	70	32
		3.3.2. Inscriptionarea tevilor PEHD	72	33
	3.4.	Caracteristicile functionale ale conductelor din polietilenă	75	33
	3.5.	Caracteristicile tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă	76	34
	3.6.	Concluzii	79	36
4.	CAL	CULUL ANALITIC AL CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ		
	SUB.	ΓERANE	80	37
	4.1.	Dimensionarea conductelor din polietilenă subterane	80	37
		4.1.1. Determinarea grosimii de perete	80	37
i	ng. Ioan	na-Daniela Manu		

## **CUPRINS**

		4.1.2. 4.1.3.	Verificarea conductelor din polietilenă subterane Determinarea solicitărilor maxime ale conductelor din	80	37
			polietilenă subterane	81	37
	4.2.	Proiecta	rea sistemelor de conducte din PEHD	81	38
		4.2.1.	Evaluarea rezistenței portante a conductelor din polietilenă subterane	81	38
		4.2.2.	Determinarea sarcinii exterioare totale la care este supusă țeava		
			îngropată din PEHD	86	41
			4.2.2.1. Determinarea presiunii active medie verticală a	97	41
			4.2.2.2. Determinarea presiunii dinamice sau a	80	41
			suprapresiunii din trafic	88	42
			4.2.2.3. Determinarea presiunii verticale totale	89	42
			datorită deformării conductei	89	42
			4.2.2.5. Determinarea presiunii datorată prezenței apei	0.0	40
		122	Subterane	90	42
		4.2.3. 1 2 1	Verificarea stabilității	90	43
		4.2.5	Verificarea ovalizării tevilor din PEHD subterane	92 92	44
	4.3.	Determi	inarea stării de tensiuni din peretele tevii	94	44
		4.3.1.	Determinarea stării de tensiuni din peretele țevii datorată	0.4	
		4.3.2.	Determinarea stării de tensiunii din peretele țevii datorată	94	44
		433	greutății proprii a țevii Determinarea stării de tensiunii din peretele tevii datorată	97	45
		110101	greutătii apei din interiorul tevii	97	45
		4.3.4.	Determinarea stării de tensiunii din peretele țevii datorată dilatării termice	97	45
	4.4.	Calculu	l tensiunilor ce determină atingerea stării limită în peretele tevii	98	46
	4.5.	Verifica	rea ovalizării și evaluarea deformației efective a țevii îngropate		
		din PEF	ID după metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER	100	46
	4.6.	Studiu o	de caz - Evaluarea analitică a stărilor de tensiuni și deformații		
		specific	e țevilor din PEHD dintr-un sistem de conducte destinat	102	47
	47	Conclur	ției apei	103	4/
5	CER	TETĂRI	EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERISTICILE	105	40
	MEC	ANICE	ALE TEVILOR DIN POLIETILENĂ FOLOSITE LA		
	REAI	LIZARE	A SISTEMELOR DE CONDUCTE PENTRU		
	DIST	RIBUŢIA	A APEI	105	50
	5.1.	Alegere	a materialelor	107	50
	5.2.	Desfășu	rarea încercărilor experimentale	112	52
	5.3.	Rezultat	tele încercărilor experimentale și interpretarea acestora	119	54
	5.4.	Caracter	rizarea materialului (PEHD) supus cercetarilor pe baza analizei	107	50
		statistice	Principiul metodei	127	58 58
		542	Prelucrare comparativă a rezultatelor încercării la tractiune	128	63
	5.5.	Concluz		153	65
6.	CER	CETĂRI	TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND		50
	EVAI	LUAREA	<b>CARACTERISTICILOR MECANICE ALE TEVILOR</b>		
	DIN I	POLIETI	LENĂ FOLOSITE LA REALIZAREA SISTEMELOR DE		
	CON	DUCTE	PENTRU DISTRIBUȚIA APEI, ÎN PREZENȚA	4	
	DEFF	CTELO	К	156	67

6.1.	Conside mecanic	rații teoreti e ale epru	ce și experimentale privind evaluarea caracteristicilor avetelor din polietilenă ce prezintă defecte supuse	156	67
	6.1.1.	Considera mecanice	ații teoretice privind evaluarea caracteristicilor ale epruvetelor din polietilenă ce prezintă defecte	156	67
		supuse în	cercării la tracțiune	156	67
	6.1.2.	Considera	ații experimentale privind evaluarea caracteristicilor		
		mecanice	ale epruvetelor din polietilenă ce prezintă defecte		
		supuse în	cercării la tracțiune	157	67
		6.1.2.1.	Materiale utilizate la efectuarea încercării la tractiune ne enruvete ce prezintă defecte	157	67
		6.1.2.2.	Echipamente folosite la încercarea la tracțiune a	1(1	()
		(1))	epruveteior	101	69
		0.1.2.3.	tracțiune	162	69
		6.1.2.4.	Rezultatele obținute pentru epruvetele cu și fără defecte, și interpretarea acestora	163	70
6.2.	Conside	rații teoreti	ce și experimentale privind evaluarea caracteristicilor		
	mecanic	e ale țevil	or din polietilenă ce prezintă defecte, în condițiile		
	încercări	i la presiui	ne interioară	180	80
	6.2.1.	Consider	rații teoretice privind evaluarea caracteristicilor		
		mecanice	e ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte, în		
		condițiile	e încercării la presiune interioară	180	81
	6.2.2.	Consider	rații experimentale privind evaluarea caracteristicilor		
		mecanice	e ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte		
		practicate	e în mod necontrolat, în condițiile încercării la		
		presiune	interioară	183	82
		6.2.2.1.	Materiale utilizate la încercarea la presiune		
			interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă		
			defecte practicate în mod necontrolat	183	82
		6.2.2.2.	Echipamentul utilizat la încercarea la presiune		
			interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă	104	0.0
		(	defecte practicate în mod necontrolat	184	83
		6.2.2.3.	Modul de lucru al incercarii la presiune interioara a		
			ievilor din polietilena, ce prezinta defecte practicate	107	0.4
		6224	In mod necontrolat	180	84
		0.2.2.4.	interioră a tevilor din polietilenă ce prezintă		
			defecte practicate în mod necontrolat și		
			interpretarea acestora	187	84
63	Conside	ratii teoreti	ce și experimentale privind evaluarea caracteristicilor	107	04
0.5.	mecanic	e ale tevilo	ar din poliețilenă în condițiile unor solicitări multinle	193	87
	6.3.1.	Consider:	atij teoretice privind evaluarea caracteristicilor	175	07
	0.5111	mecanice	ale tevilor din polietilenă în conditiile unor solicitări		
		multiple.	and its many house and hou	193	87
	6.3.2.	Considera	atii experimentale privind evaluarea caracteristicilor		
		mecanice	ale tevilor din polietilenă în conditiile unor solicitări		
		multiple.	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	196	88
		6.3.2.1.	Materiale utilizate la încercarea la solicitări multiple		
			a țevii din polietilenă PE100 îngropată	196	88
		6.3.2.2.	Echipamente folosite la încercarea la solicitări		
			multiple a țevii din polietilenă PE100 îngropată	197	88

		6.3.2.3.	Modul de lucru al încercării la solicitări multiple a tevii din polietilenă PE100 îngropată	198	88
		6.3.2.4.	Rezultate obținute la evaluarea țevii din		
			polietilenă în condițiile unor solicitări multiple și	202	01
61	Conside	matii taamati	Interpretarea acestora	202	91
0.4.	Conside	a ala tavila	vr din policitilară ca prozintă defecta prosticate în mod		
	controls	t în condit	fi un ponetnena ce prezinta defecte practicate in mod	207	03
	6 4 1	u, in condiț Consider	atij teoretice privind evaluarea caracteristicilor	207	))
	0.1.1.	mecanice	ale tevilor din polietilenă ce prezintă defecte		
		practicate	în mod controlat, în conditiile încercării la presiune		
		interioară		207	94
	6.4.2.	Consider	ații experimentale privind evaluarea caracteristicilor		
		mecanice	ale tevilor din polietilenă ce prezintă defecte		
		practicate	în mod controlat, în condițiile încercării la presiune		
		interioară	· • •	208	94
		6.4.2.1.	Materiale utilizate la încercarea la presiune		
			interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă		
			defecte practicate în mod controlat	208	94
		6.4.2.2.	Echipamentul folosit în cadrul încercării la		
			presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce		
			prezintă defecte practicate în mod controlat	209	94
		6.4.2.3.	Modul de lucru al încercării la presiune interioară a		
			țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate		
			în mod controlat	209	95
		6.4.2.4.	Rezultate obținute la încercarea la presiune		
			interioară a țevilor cu defecte practicate în mod		
			controlat și interpretarea acestora	209	95
5.5.	Degrada	area, rupere	ea și estimarea duratei de viață a țevilor din polietilenă	222	101
	6.5.1.	Degradar	ea țevilor din polietilenă	222	101
	6.5.2.	Ruperea	tevilor din polietilenă	223	101
		6.5.2.1	Ruperea țevilor din polietilenă fără defecte	225	102
		6.5.2.2.	Ruperea țevilor din poliețilenă ce prezintă defecte	226	103
	6.5.3.	Estimarea	a duratei de viață a țevilor din polietilenă	227	103
	6.6.	Concluzii		230	105
CON	CLUZII.	CONI E A CEDO	RIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE	222	107
CUN . 7 1		E A CEKC -::	E I ARILOR	233	107
/.1. 7 2	Contrib	utii origina	10	233	107
/.2. 7 2	Directii	da continu	le	237	109
/.3. DIDI				230	110
ANE	IUGNAF VF	112 ·····		239	-
	Anexa 1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		240	-
	Anexa	2		261	_
	Anexa	3		265	_
	Anexa 4	1		274	-

7.

### **INTRODUCERE**

Integritatea sistemului sub presiune este rezultatul cumulativ al respectării normativelor, standardelor și ghidurilor de bune practici, cărți tehnice etc. Aceste reglementări tehnice sunt imperios necesare pentru asigurarea proiectării judicioase, fabricației de calitate, instalării și operării responsabile, inspecției realizată cu atenție, evaluării riguroase, mentenanței/întreținerii cu zel/sârguință și reparării/reabilitării sau înlocuirii în momentul necesar.

Pentru fiecare etapă ce contribuie la obținerea integrității conductei din polietilenă din rețeaua de distribuție a apei, a funcționării în siguranță a acesteia și a asigurării unei durate de viață cât mai mare, sunt consultate documentele – "pietre de temelie" – corespunzătoare proiectării, fabricației, pozării, operării, evaluării, mentenanței, reabilitării și, după caz, înlocuirii conductei.

Pornind de la acest cadrul legislativ, primul pas în elaborarea lucrării de doctorat a fost identificarea problemei prin realizarea legăturii între necunoscută – influența defectelor asupra rezistenței țevilor din polietilenă – și date, sinteza acestor date, verificarea rezultatului și aprecierea critică.

Lucrarea pornește de la presupunerea/ipoteza că valorile tensiunilor și deplasărilor dezvoltate într-o conductă de PE100 îngropată, care face parte dintr-o rețea de apă potabilă și care prezintă defecte, sunt direct influențate de o serie de factori ce depind pe de o parte de țeavă și de tipul defectului (material și geometrie) și de cealaltă parte de sarcinile care acționează asupra acesteia.

În acest sens, cercetarea a fost concepută în cadrul a două programe experimentale:

- a) primul program experimental a avut scopul de a determina valorile parametrilor mecanici în cadrul încercării la tracțiune și a încercării la oboseală și de a compara rezultatele astfel obținute cu valori indicate în literatura de specialitate,
- b) cel de-al doilea program experimental a vizat:

- utilizarea încercării la tracțiune pe epruvete pe care s-au practicat crestături/defecte cu scopul de a evalua influențele defectelor de tip lipsă de material asupra rezistenței mecanice a țevilor de polietilenă,

- realizarea încercării la presiune interioară a țevilor din polietilenă ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat cu scopul de a evalua influența unui defect de tipul combinației de *urmă de lovitură/adâncitură* și *smulgere/*dent-gouge prin factorul de rezistență reziduală, *RSF*,

- realizarea încercării la solicitări multiple a țevii din polietilenă PE100 îngropată cu scopul de a evalua influența unui defect ce se poate realiza pe suprafața exterioară a țevii în timpul instalării în şanț, prin simularea suprasarcinii localizate din trafic și a presiunii interioare, și determinarea factorului de intensitate a tensiunii,  $K_I$ ,

- evaluarea parametrilor mecanici prin încercarea la presiune interioară a țevilor ce prezintă defect practicat în mod controlat de tipul *defect asemănător fisurii*/crack-like flaw prin diagrama de evaluare a cedării/Failure Assessment Diagram (FAD), determinarea valorilor înregistrate ale presiunii critice,  $P_{cr}$ , și ale timpului critic,  $t_{cr}$ , determinarea valorii adâncimii critice a defectului,  $a_{crit}$ , și a duratei de viață remanentă, t, prin utilizarea unei formule de calcul din literatura de specialitate.

Verificarea normalității distribuției datelor obținute în cadrul unui studiu realizat cu produsul informatic (Procesarea statistică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results/SPER) a fost realizată prin aplicarea testului  $\chi^2$  pe considerentul că acest test facilitează compararea a două distribuții observate.

Evaluarea influenței prezenței crestăturilor/defectelor pe suprafața epruvetelor a fost realizată printr-o comparație între valorile parametrilor mecanici, fie înregistrați în timpul încercării experimentale, fie determinați analitic, parametrii corespunzători epruvetelor cu defect transversal, cu defect longitudinal și fără defect.

Analiza numerică a variației dimensiunilor defectului – adâncime și lungime – a facilitat comparația dintre valorile tensiunilor și deformațiilor înregistrate de epruvetele și țevile din polietilena PE100.

### **ABREVIERI**

ASTM – Societatea Americană pentru Testarea Materialelor (American Society for Testing of Material)

CCCT – curba caracteristică convențională la tracțiune

CCR – curba caracteristică reală la materialului

DPR - gradul de compactare (Proctor), [%]

DSL – durata de încărcare susținută (Loading Sustained Duration)

FAD – diagrama de evaluare a cedării (Failure Assessment Diagram)

HMW HDPE - polietilenă de înaltă densitate cu masă moleculară și densitate mare

LCA – evaluarea ciclului de viață (Life Cycle Assessment)

LEFM - mecanica ruperii în domeniul liniar elastic (Linear Elastic Fracture Mechanics)

MRS – rezistența la tracțiune minim garantată, (Minimum Required Strength)

MOP – presiunea maximă de exploatare (Maximum Operating Pressure)

PE – polietilenă

PE100 - polietilena de înaltă densitate cu rezistența la tracțiune minim garantată, MRS, de 10 MPa

PEHD – polietilenă de înaltă densitate (High Density Poly Ethylene)

RSF – factorul de rezistență reziduală (Remaining Strength Factor)

SIF – factorul de intensitate a tensiunii (Stress Intensity Factor)

SDR - raportul dimensional standard (Standard Dimension Ratio)

*a* – adâncime defect, [mm]

 $a_1$  – grosimea minimă a patului de pozare, [mm]

 $a_r$  – proiecția relativă, [mm]

A – coeficient care reprezintă valoarea amplitudinii unui ciclu

A0- aria secțiunii din zona calibrată, [mm<sup>2</sup>]

 $A_d$  – aria defect, [mm<sup>2</sup>]

 $b_1$  – lățimea părții înguste (în zona calibrată), [mm]

*b*<sub>2</sub>-lățimea la extremități, [mm]

B – lățimea efectivă a șanțului, [m]

 $B_1$  – exponent ce depinde de tipul de material și de caracteristicile acestuia

 $A_c$  – alungirea la curgere, [%]

 $A_r$  – alungirea procentuală după rupere, [%]

 $B_{min}$  – lățimea minimă a șanțului, [m]

c – jumătate din lungimea defectului, măsurată în direcția în care defectul se extinde, [mm]

2*c* – lungimea defectului, [mm]

C – coeficient total de operare

Cg - coeficientul de suprasarcină din diagrama lui MARSTON

 $C_L$  – factorul de ajustare a modulului solului

 $C_p$  – coeficient de corecție ce ține cont de presiunea exercitată pe secțiunea transversală și longitudinală a țevii

 $C_v^*$  - coeficientul deformației diametrale verticale

 $C_{v1}$  – coeficientul pentru deformația verticală

 $C_{v2}$  – coeficientul pentru deformația orizontală

 $D_e$  – diametrul exterior, [mm]

 $D_i$  – diametrul interior, [mm]

 $D_n$  – diametrul exterior nominal, [mm]

 $D_m$  – diametrul mediu, [mm]

*D*x – diametrul corespunzător punctului din țeavă în care tensiunea radială este calculată, [mm].

 $E_1$  – modulul de deformare pentru umplutura de deasupra generatoarei superioare a țevii (coroanei țevii), [MPa]

E – modulul de elasticitate sau modulul lui Young

 $E_2$  – modulul de deformare pentru umplutura laterală a țevii, [MPa]

- *E*<sub>3</sub> modulul de deformare pentru solul neperturbat din peretele şanţului, [MPa]
- $E_4$  modulul de deformare pentru materialul fundației de sub țeavă, [MPa]
- $E_a$  modulul de elasticitate aparent, [MPa]
- *E<sub>f</sub>*,*s* modulul de elasticitate efectiv pe termen scurt, [MPa]
- $E_{f,l}$  modulul de elasticitate efectiv pe termen lung, [MPa]
- $E_i$  modulul de elasticitate instantaneu, [MPa]
- $E_m$  modulul de elasticitate instantaneu, [MPa]
- E' modulul total al reacției solului, [MPa]
- $E_{tc}$  modulul la fluaj, [MPa]
- f parametru de aplatizare
- $f_A$  coeficient de creștere sau descreștere în funcție de aplicație (pentru apă  $f_A = 1$ )
- $f_P$  coeficient de reducere a presiunii
- $f_s$  frecvența ciclurilor, [Hz]
- $F_{cr}$  forță critică, [N]
- $F_c$  forța concentrată aplicată la suprafața terenului, [N]
- $F_{dil}$  efort longitudinal, [N]
- $F_{ext}$  forța externă pe capac, [N];
- $F_{max}$  forță maxime de solicitare, [N]
- $F_1$ ,  $F_2$  forțele care acționează asupra țevii, [kN]
- $F_s$  factorul de siguranță împotriva ovalizării
- $g_d$  grosime defect, [mm]
- G-modulul de elasticitate transversal, [MPa]
- G<sub>0</sub>-modulul de elasticitate transversal la temperatura de referință, [MPa]
- $G_t$  greutatea proprie a țevii, [N]
- h grosimea recomandată, dimensiunea inițială a secțiunii transversale, [mm]
- $h_s$  înălțime ștanță, [mm]
- H-înălțimea de acoperire, [m]
- *H<sub>min</sub>* înălțimea de acoperire minimă, [m]
- $H_{max}$  înălțimea de acoperire maximă, [m]
- J-variația de energie potențială la creșterea fisurii, [J]
- $JI_c$  valoarea critică a variației de energie potențială la creșterea fisurii, [J]
- K<sub>1</sub> coeficientul lui Rankine
- $K^*$  coeficientul presiunii de rezemare
- $K_I$  factorul de intensitate a tensiunilor corespunzător modului I de propagare prin deschidere a fisurii, [MPa·m<sup>1/2</sup>]
  - $K_{Ic}$  tenacitatea la rupere a materialului, [MPa ·m<sup>1/2</sup>]
  - $K_c$  factorul de intensitate a tensiunii static, [MPa ·m<sup>1/2</sup>]
  - $K_d$  factorul de intensitate a tensiunii dinamic, [MPa ·m<sup>1/2</sup>]
  - $K_t$  coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor
  - *l* lungime elementară, [mm]
  - $l_s$  lățime ștanță, [mm]
  - $L_t$  lungimea țevii, [mm]
  - $L_0$  lungimea de referință, [mm]
  - L distanța inițială între cleme (repere de reglare), măsurată în partea centrală a epruvetei, [mm]
  - $L_1$  lungimea părții înguste (în zona calibrată) cu fețe paralele, [mm]
  - $L_2$  distanța dintre punctele de început ale racordărilor, [mm]
  - $L_3$  lungimea totală, [mm]
  - $L_s$  lungime stanță, [mm]
  - n constantă de material dependentă de temperatură (la fluaj)
  - $n_1$  exponent independent de temperatură
  - $n_2$  coeficient ce ține seama de tipul terenului
  - Ing. Ioana-Daniela Manu

m – constantă de material dependentă de temperatură (la fluaj) N- fortă axială, [N]  $N_0$  – numărul de cicluri până la care se realizează încercările pentru epruvetele care nu se rup M – moment încovoietor, [N·mm]  $O_v$  – ovalitatea, [mm]  $P_{adm}$  – presiunea de lucru admisibilă, [bar]  $P_n$  – presiunea nominală sau presiunea maximă de serviciu, [bar]  $P_{max}$  – presiunea maximă înregistrată sau tensiunea circumferențială de spargere măsurată, [MPa]  $P_e$  – presiunea exterioară totală, [MPa]  $P_i$  – presiunea interioară, [bar]  $P_{inc}$  – presiunea de încercare, [bar]  $P_{v,tot}$  – presiunea verticală totală, [daN/cm<sup>2</sup>]; 1 daN/cm<sup>2</sup> = 0,1 MPa  $P_h$  – presiunea de reacție orizontală/laterală a solului datorită deformării conductei, [daN/cm<sup>2</sup>]  $P_{ava}$  – presiunea datorată prezenței apei subterane, [daN/cm<sup>2</sup>]  $P_{cr}$  – presiunea critică, [daN/cm<sup>2</sup>]  $P_{crl}$  – presiune critică pe termen lung, [daN/cm<sup>2</sup>]  $P_{crs}$  – presiune critică pe termen scurt, [daN/cm<sup>2</sup>]  $P_v$  – presiunea activă medie verticală a solului, [daN/cm<sup>2</sup>]  $P_t$  – presiunea dinamică sau suprapresiunea din trafic, [daN/cm<sup>2</sup>]  $q - \hat{n}c\bar{a}rc\bar{a}ri$  uniform distribuite, [daN/cm<sup>2</sup>]  $q_t$  - sarcina totală la care este supus inelul de teavă de lungime 10 mm  $q_T$  – încărcărea uniform distribuită provenită din trafic, [daN/cm<sup>2</sup>]  $Q_t$  – sarcina totală care actionează asupra tevii, [MPa] *r* – raza de racordare, [mm]  $r_1, r_2$  – distanța pe orizontală din punctul de solicitare până în axa țevii, [m]  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  – coeficientul de asimetrie  $R_i$  – raza interioară a țevii, [mm]  $R_e$  – raza exterioară a țevii, [mm]  $R_m$  – raza medie, [mm]  $R_{tr}$  – rezistența la tracțiune sau rezistența la rupere (pe CCCT a materialului), [MPa] s – grosimea de perete nominală, [mm]  $s^2$  – dispersia  $s_n$  – abaterea normală  $s_{\min}$  – grosimea de perete minimă, [mm]  $s_{\rm max}$  – grosimea de perete maximă, [mm] S – seria tubulaturii  $S_t$  – rigiditatea specifică a țevii, [MPa]  $S_{st}$  – raportul de rigiditate al sistemului sol-țeavă  $S_{vu}$  – rigiditatea verticală a umpluturii, [MPa]  $S_1$  – secțiunea transversală a tevii, [mm<sup>2</sup>] t - timp, [s] $t_{cr}$  – timp critic, [s]  $t_r$  – timp până la rupere, [s]  $tan \delta$  – coeficientul de amortizare histeretică a maerialului T-temperatură, [°C]  $T_0$  – temperatură de referință, [°C]  $T_{max,r}$  – sarcina maximă pe roată, [daN]  $T_v$  – temperatură de tranziție sticloasă, [°]  $U_d$  – energie specifică de deformație v – viteza de solicitare standard, [mm/s]  $V_{apa}$  – volumul de apă din interiorul țevii, [mm]

```
V_t – volumul tevii, [mm<sup>3</sup>]
u, v, w - deplasare, [mm]
W – modulul de rezistență, [m<sup>3</sup>]
W_e – densitatea energiei de deformare, [J/m<sup>3</sup>]
x și x_0 – coeficienți de corecție
x - media aritmetică
2\alpha - unghiul de asezare al tevii
2\alpha_1 – deschidere unghiulară a fisurii, [°]
\alpha_d – coeficientul de dilatare termică liniară, [mm/m/°C]
\beta – unghiul de înclinare al taluzului (peretelui); tg \beta = H/L și se măsoară în %, 1:m sau grade
\gamma – greutatea specifică, [g/cm<sup>3</sup>]
\gamma_{ap\check{a}} – greutatea specifică a apei, [N/m<sup>3</sup>]
\gamma_{PE100} – greutatea specifică a polietilenei, [N/m<sup>3</sup>]
\gamma_{sol} – greutatea volumică a solului, [t/m<sup>3</sup>]
\gamma_{sol-apă} – greutatea specifică submersată, [t/m<sup>3</sup>]
\gamma_1 - asimetria
\delta_0 – deformație inițială, [mm]
\delta_{ef} – deplasare totală maximă efectivă sau deformație efectivă (tridimensională), [mm]
\delta_f – deformatie final, [mm]
\delta_{max} – deformația maximă admisibilă, [mm]
\delta_c – deplasarea de deschidere a fisurii, \delta_c (static)
\delta_d – deplasarea de deschidere a fisurii (dinamic)
\frac{\delta_{\nu}}{2} – deformația pe verticală a țevii
D_{e}
\frac{\delta_h}{1} – deformația pe orizontală a țevii
D_{e}
\Delta D = D_V - D sau \Delta D = D_Q - D - schimbarea maximă de diametru
\Delta L – dilatarea termică a tevii îngropate, [mm]
\Delta T – diferența de temperatură, [°C]
\varepsilon_p – deformație specifică procentuală, [%]
\dot{\epsilon} – rata de fluaj sau de deformare, [mm/s]
\varepsilon_c – deformatia la fluaj
\varepsilon^{f} – deformația viscoelastică la fluaj
\varepsilon_v – deformația specifică la curgere, [%]
\varepsilon_{tr} – deformația specifică la tracțiune, [%]
\zeta – factor de corecție pentru rigiditatea patului de pozare
μ – coeficientul lui Poisson
\rho_m – densitatea materialului, [kg/m<sup>3</sup>]
\rho_1 – raza la vârf a fisurii, [mm]
\sigma_{max} – tensiunea maximă, [MPa]
\sigma_{min} – tensiunea minimă, [MPa]
\sigma_{med} = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2 – tensiunea medie, [MPa]
\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} – amplitudinea ciclurilor, [MPa]
\sigma_{adm} – tensiunea admisibilă a materialului țevii, [MPa]
\sigma_c – tensiune circumferențială, [MPa]
\sigma_{c1} – tensiune de calcul, [MPa]
\varphi_d – coeficient dinamic
\sigma – tensiune mecanică, [MPa]
\sigma_{dil} – tensiune longitudinală de dilatare, [MPa]
                                                                                                              9
 Ing. Ioana-Daniela Manu
```

- $\sigma_{ech}$  tensiunea echivalentă, [MPa $\sigma_h$  tensiunea hidrostatică, [MPa]
- $\sigma_l$  tensiune longitudinală, [MPa]
- $\sigma_{tr}$  rezistența la tracțiune sau rezistența la rupere (pe CCR), [MPa]
- $\sigma_{LCL}$  limita inferioară de încredere (siguranță) a rezistenței hidrostatice pe termen lung, [MPa]
- $\sigma_{LPL}$  limita inferioară a rezistenței hidrostatice pe termen lung, [MPa]
- $\sigma_{LTHS}$  rezistența hidrostatică pe termen lung, [MPa]
- $\sigma_r$  tensiunea radială, [MPa]
- $\sigma_R$  rezistența oboseală sau rezistența la solicitări maxime, [MPa]
- $\sigma_s$  tensiunea de proiectare, [MPa]
- $\sigma_T$  tensiunea tangențială indusă în perete, [MPa]
- $\sigma_y$  limita la curgere, [MPa]
- $\sigma_{\epsilon,t}$  limita tehnică la fluaj, [MPa]
- $\tau$  tensiune tangențială, [MPa]
- $\tau_0$ -tensiunea tangențială la temperatura de referință, [MPa]
- $\phi$  unghiul de frecare internă a solului, [°]
- $\Phi$  coeficient de impact
- $\chi$  coeficient de sarcină a terenului care depinde de caracteristicile acestuia și geometria șanțului
- $\chi_0^{0}$  coeficient de sarcină a terenului care depinde de caracteristicile acestuia și geometria șanțului

## **INDEX FIGURI**

Fig. 1.1.	Depozitarea corespunzătoare în șantier a țevilor din polietilenă PE 19
Fig. 1.3.	Forma sectiunii transversale a tevii deformate, sub formă de elipsă 20
Fig. 2.2.	Instalația ICECHIM-Dudești de producere a polietilenei 22
E. 22	Curba convențională caracteristică la tracțiune: a) specifică polimerilor; b)
Flg. 2.3.	specifică polietilenei de înaltă densitate
Fig. 2.4.	Reprezentarea grafică a ciclului simetric: a) în coordonate $\sigma - t$ ; b) în coordonate
	$\sigma - \varepsilon$
Fig. 2.5.	Curba lui Wöhler: a) poziționarea rezistenței la oboseală, $\sigma_R$ , pe curba lui Wöhler;
	b) reprezentarea în coordonate semilogaritmice
Fig. 2.12.	Instalația de extrudare
Fig. 2.13.	Schema de principiu a unei linu de extrudare pentru jevile din PEHD
Fig. 3.2.	<i>Elementele componente ale unui sistem de conducte</i>
Fig. 3.3.	Configurația rețelei de distribuție a apei potabile
Fig. 3.5.	Coturi cilindrice, reprezentare ortogonală și tridimensională: a. și b. la 90 °; c. și d. la 45 °
Fig. 3.8.	Ramificații: a. teu egal PE100 SDR17; b. teu redus PE100 SDR17; c. teu egal
	electrosudabil PE100; d. Teu redus electrosudabil PE100
Fig. 3.13.	Inscripționarea țevilor PEHD pentru apă potabilă 33
Fig. 3.14.	Diagrama curbelor de regresie pentru PE100
Fig. 4.2.	Instalarea țevii în șanț redată schematizat
Fig. 4.4.	<i>Tipuri de reazem: a) tip reazem nr.1; b) tip reazem nr. 2; c) tip de reazem nr. 3</i> 39
Fig. 4.5.	Grupele de soluri
Fig. 4.6.	Presiunea verticală a solului la nivelul generatoarei superioare a țevii
Fig. 4.8.	<i>Elemente necesare în determinarea presiunii datorate prezenței apei subterane</i> 43
Fig. 4.16.	Tensiunile ce acționează în peretele țevii
Fig. 4.17.	Model de evaluare a deformației efective a țevii din PEHD subterană
Fig. 5.5.	<i>Epruveta solicitată la încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă:</i> <i>a) aspect schematizat (conform</i> NFT 51 120-4 [71] $d = 6 \dots 10 \text{ mm}, L_0 = \text{min } 3d$ ,
E:- 5 11	$r \ge 3a$ ; b) aspect real
Fig. 5.11.	Diagramele iensiunii și momentului de încovolere
Flg. 5.12.	Curba incercarii la iracțiune pentru epruvetele prelevate ain airecție
	DE 100 portru apă: a) 141: b) 241: a) 241
Fig 5 13	r E100 pentru upu. u) IAI, u) 2AI, c) SAI
1 ig. J.1J.	albastre ce constituie marcaiul tevilor din PE100 pentru ană
Fig. 5.14.	<i>Curba epruvetei 3A2 prelevată din direcția circumferențială, între liniilor albastre</i>
8	ce constituie marcaiul tevilor din PE100 pentru ană
Fig. 5.15.	Aspectul enruvetelor dună realizarea încercării la tractiune
Fig. 5.17.	Curba caracteristică reală a materialului pentru determinarea modulului de
3	elasticitate initial al materialului, $E_0$
Fig. 5.19.	Analiza comparativă a curbelor caracteristice reale ale materialului
Fig. 5.21.	Înregistrarea numărului de cicluri de solicitare pe panoul masinii de încercare la
6	oboseală prin încovoiere rotativă
Fig. 5.22.	Curba lui Wöholler pentru materialelor polietilenă PE100 sup us încercării la
5	oboseală la durabilitate limitată: a) curba rezistenței la oboseală; b) reprezentarea
	<i>în coordonate semilogaritmice</i>
Fig. 5.25.	Reprezentări grafice ce indică forma distribuției serie de date 1A1-tensiuni
Fig. 5.37.	Compararea densității de repartiție după media aritmetică
Fig. 6.5.	Forma si dimensiunile crestăturii longitudinale

Fig. 6.6.	<i>Epruvetele utilizate în încercarea la tracțiune: a) epruvetă cu crestătură transversală (T): b) epruvetă cu crestătură longitudinală (L): c) epruvetă fără</i>
	$defect (FD) \qquad \qquad$
Fig 68	Masina universală IFM nentru teste statice și dinamice de la 150 la 400 kN 69
Fig. 6.10	Freza utilizată la realizarea crestăturilor
Fig. 6.11	a) Diagrama fortă – alungire pentru enruveta En1 (T): h) Diagrama fortă –
1 ig. 0.11.	alungire pentru epruveta Ep2 (T)
Fig. 6.15.	Diagrama forță – alungire pentru epruveta Ep5 71
Fig. 6.16.	Aspectul epruvetelor la finalul experimentului
Fig. 6.17.	Diagrama forță - alungire $F - \Delta l$ pentru epruvetele $Ep 1 - Ep 5$
Fig. 6.18.	Curbele tensiune – deformație $\sigma$ - $\varepsilon$ pentru epruvetele Ep1–Ep5
Fig. 6.22.	Poziționarea valorii calculate, $z_{calc}$ , în raport cu regiunile critice: a) valoarea $z_{calc}$ = - 2,6595 pentru variabila 1 – Ep2 (T); b) valoarea $z_{calc}$ = - 0,9202 pentru
	$variabila \ I - Ep4 \ (L) \qquad \qquad$
Fig. 6.25.	Etapele Setup și Solution ale analizei numerice aplicate epruvetelor cu și fară
<b>F:</b> ( <b>A</b> (	defecte supuse incercarii la tracțiune: a) și e) $Ep1$ ; b) și f) $Ep4$ ; c) și g) $Ep5$
Fig. 6.26.	Valorile deformației inregistrată prin simulare numerică pentru epruvetele cu și
E. ( )7	<i>fara defecte supuse incercarii la tracțiune: a) Ep1; b) Ep4; c) Ep5</i>
Fig. 6.27.	Parametrii mecanici pentru epruvetele cu defect transversal Ep1 și Ep2
Fig. 6.28.	Parametrii mecanici pentru epruvetele cu defect longitudinal Ep3 și Ep4
Fig. 6.29.	Parametrii mecanici pentru epruveta fara defect Eps 80
Flg. 6.30.	Corpurile de proba utilizate in caarul incercarii la presiune interioara: a) țeava $I = fără defect: b)$ teava $II = cu defect: c) = teava III = cu defect 83$
Fig 6 32	Instalatia experimentală utilizată pentru încercarea la presiune interioară a tevilor
1 18. 0.52.	din nolietilenă (vedere generală)
Fig. 6.33.	<i>Tevile-cornuri de probă sunuse încercării la presiune interioară</i>
Fig. 6.34.	Diagrama presiune - timp. (bar - s). pentru teava I
Fig. 6.37.	Diagrame pentru teava II: a) $P_i - t$ ; b) $\sigma_c - P_i$ ; c) $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d) $\sigma_l - P_i$
Fig. 6.38.	Diagrama presiune – timp. $(bar - s)$ pentru teava III.
Fig. 6.40.	Diagrame pentru studiul comparativ al comportamentului tevilor I. II si III la
8	incercarea la presiune interioară: a) $P_i - t$ ; b) $\sigma_c - P_i$ ; c) $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d) $\sigma_l - P_i$
Fig. 6.42.	Sectiune într-o țeavă PE100 cu defect semieliptic nepătruns
Fig. 6.43.	Teava din polietilenă PE100 utilizată pentru încercarea la solicitări multiple 88
Fig. 6.46.	, Pompa manuală de testare presiune Rems Push: a) vedere generală; b) detaliu 88
Fig. 6.49.	Realizarea reprezentării grafice a reperelor pe suprafața țevii PE100: a) trasarea
C	reperelor verticale; b) trasarea reperelor orizontale; c) aspectul final al
	reprezentării grafice a reperelor trasate pe suprafața exterioară a țevii PE100 89
Fig. 6.51.	Aplicarea unei sarcini exterioare (122,3963 kg), în zona cu defect, pentru simularea
_	suprasarcinii localizate, din trafic
Fig. 6.52.	Defecte de tip lipsă de material identificate pe suprafața exterioară a țevii PE100:
	a) amprentă; b) zgârietură; c) microfisură 90
Fig. 6.54.	Solicitarea la presiune interioară a țevii
Fig. 6.57.	Ruperea țevii din polietilenă PE100 evaluată în condițiile unor solicitări multiple 91
Fig. 6.58.	Diagrama presiune-timp, $(bar - s)$ , pentru țeava din polietilenă PE100 evaluată în
Fig 6 60	Continue unor solicitum muniple
1°1g. 0.00.	meanice: b) valori ale defromatiiler: c) valori ale tensiunii echivalente
Fig 6 61	Analiza narametrilor - modificare adâncime defect
Fig. 0.01.	Analiza parametrilor - modificare hungime defect
1'12. 0.02. Fia 6 64	Tani fără și cu defecte practicate în mod controlat supuse încereării la presiure
1°1z. 0.04.	jevi juru și cu uejecie prucucule în mou controlui supuse încercuru în presiune interiogră: a) teava fără defect (teava 11): b) teava cu defect orientat în dinectie
	circumferentială (teava II 2C): c) teava cu defect orientat în direcție longitudinală
	(teava III.3L)
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Fig. 6.67.	Diagrama presiune – timp, (bar – s), pentru țeava cu defect în direcție circumferențială (teava II 2C)	95
Fig. 6.70.	Diagrame pentru țeava cu defect în orientat direcție longitudinală (țeava III.3L): a) $P_i - t$ ; b) $\sigma_c - P_i$ ; c) $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d) $\sigma_l - P_i$	96
Fig. 6.71.	<i>Ţevi fără și cu defecte practicate în mod controlat, sparte în încercarea la presiune interioară: a) țeava fără defect (țeava I.1); b) țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C); c) țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (teava III.3L)</i>	96
Fig. 6.72.	Diagrame pentru studiul comparativ al comportamentului țevilor: I.1; II.2C și III.3L la încercarea la presiune interioară: a) $P_i - t$ ; b) $\sigma_c - P_i$ ; c) $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d) $\sigma_l - P_i$	97
Fig. 6.73.	Diagrama FAD	98
Fig. 6.74.	Etape ale evaluării numerice: a) schița defectului realizată în AutoCAD; b) schița defectului realizată în DesignModeler; c) dimensionarea defectului; d) discretizarea modelului; e) țeava fără defect (țeava I.1); f) țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C); c) țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (teava III.3L)	99
Fig. 6.75.	Analiza parametrilor – teava II.2C – modificare adâncime defect	100
Fig. 6.76.	Analiza parametrilor – teava II.2C – modificare lungime defect	100
Fig. 6.81.	Modelul lui Peterlin	102
Fig. 6.83.	Etape caracteristice ruperii țevilor din polietilenă	102
Fig. 6.84.	Rupere fragilă: a) preluare din [172]; b) rezultat al încercării la presiune interioară a tevii I fără defect	102
Fig. 6.86.	Rupere ductilă: a) rezultat al încercării țevii din polietilenă PE100 la solicitări multiple; b) preluare din [13]; c) țeavă cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L); d) preluare din [172]	102

## **INDEX TABELE**

Tabelul 2.5.	Valorile proprietăților mecanice ale materialelor principale utilizate pentru transportul și distribuției apei potabile	24
Tabelul 2.6.	Date referitoare la determinarea rezistentei la oboseală $\sigma_{P}$ a materialului PE	26
Tabelul 2.8.	Proprietățile mecanice de fluai ale materialului extrudat poliețilenă (PE)	27
Tabelul 3.7.	Valori ale presiunii nominale. $P_n$ . (bar)	34
Tabelul 3.9.	Valorile rezistentei la tractiune minim garantată, MRS. (MPa)	35
Tabelul 4.1.	Clase de pământuri în care pot fi practicate reazeme SR EN ISO 14688-2	39
Tabelul 4.2.	Valorile modulilor de deformare E1. E2. E3. E4	40
Tabelul 5.3.	Caracteristicile dimensionale ale epruvetelor folosite la încercarea la	
	tractiune (măsurători realizate cu respectarea ISO 16012	51
Tabelul 5.4.	Dimensiunile geometrice ale epruvetei testate și valorile parametrilor de	
	încercare	52
Tabelul 5.6.	Date primare și rezultate obținute la încercarea la tracțiune a celor	
	şaisprezece epruvete	54
Tabelul 5.10.	Evaluarea SPER a tensiunilor mecanice	60
Tabelul 5.11.	Valo anos tak olată a mănimii $\chi_c^2$	60
Tababul 5 17	Valloureu lubelulu u marimili a se	
Tabelul 3.12.	verificarea normaniații aistribuției adielor prin iestal repartiției $\chi^2$ – tenstant	61
Tabelul 5 14	Valorile coeficientului de variatie CV(r) pentru tensiunile mecanice	01
<i>Iuvelul 3.14</i> .	determinate experimental	63
Tabelul 5 16	Valorile medii ale narametrului limita de curgere $\sigma_{\rm c}$	64
Tabelul 5.10.	Valorile medii ale parametrului rezistentă la tractiune $\sigma_{tu}$	64
Tabelul 5.18.	Valorile medii ale parametrului alungire procentuală după rupere. Er	65
	Valorile dimensiunilor geometrice ale enruvetelor si crestăturilor/defecte	00
Tabelul 6.2.	practicate pe acestea	68
T 1 1 1 C F	Rezultate înregistrate la încercarea la tracțiune a epruvetelor cu defect	
Tabelul 6.5.	longitudinal	71
Tabelul 6.6.	Rezultate înregistrate la încercarea la tracțiune a epruvetei fără defect (FD)	71
Tababul 6 7	Rezultatele obținute prin comparația valorilor caracteristicilor tehnice ale	
Tabelul 0.7.	epruvetelor cu defect transversal și ale epruvetei fără defect	73
Tabahul 6 9	Rezultatele obținute prin comparația valorilor caracteristicilor tehnice ale	
<i>Iuvelul</i> 0.0.	epruvetelor cu defect longitudinal și ale epruvetei fără defect	74
Tabelul 6 Q	Rezultatele analizei statistice Data Analysis (Descriptive Statistics) pentru	
1000101 0.7.	epruvetele supuse încercării la tracțiune	74
Tabelul 6.11.	Rezultatele obținute prin utilizarea z-Test: Two Sample for Means din Analysis	
	Tools pentru variabila $1 - Ep2(T)$ și variabila $2 - Ep5(FD)$	76
Tabelul 6.12.	Rezultatele obținute prin utilizarea z-Test: Two Sample for Means din Analysis	
<b>TIII</b> (1)	Tools pentru variabila $I - Ep4(L)$ și variabila $2 - Ep5(FD)$	77
Tabelul 6.13.	Caracteristici de material ale polietilenei PE100	/8
<i>Tabelul 6.14.</i>	Dimensiunile defectelor prezentate de țevile II și III	83
1 <i>adelul</i> 0.13.	Kezultalele inregistrate la testarea jevil 1 jara deject (FD)	84
Tabelul 6.19.	valori ale parametrilor caracteristici incercarii la presiune interioara a	86
Tabalul 6 22	jevnor juru și cu aejecie practicale în moa neconirolal	00 05
1000101 0.23. Tabahul 6 97	Valori presiuna critică timp critic	93 104
1uveini 0.4/.	ruion presinne criticu – ump critic Durata de viată a tevii cu defect în direcție circumferențială (teava $U(2C)$ și	104
Tabelul 6 28	tevii cu defect în direcție longitudinală (teava III 31) sunuse încercării la	
1	nresiune interioară	104
	p. counce and round	101

#### ABSTRACT

Tema "CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA REZISTENȚEI MECANICE A CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ" reprezintă subiectul cercetării, concretizat în prezenta teză de doctorat. Lucrarea are ca obiective soluționarea unei segment important din problemele cu privire la descrierea solicitărilor mecanice la care sunt supuse conductele din polietilenă, a evaluării analitice, experimentale și numerice a influenței principalelor tipuri de defecte asupra rezistenței mecanice a conductelor din polietilenă și a mecanismelor de degradare a țevilor din polietilenă utilizate în rețelele de transport și distribuție a apei.

Cunoașterea modurilor în care defectele existente sau realizate în materialul tubulaturii conductelor din polietilenă influențează comportamentul sub sarcină a conductelor determină reduceri substanțiale de costuri și, deci, avantaje economice în întregul flux tehnologic fabricare-exploatare.

Lucrarea este structurată în șapte capitole, în care este prezentată atât problematica utilizării în siguranță a sistemele de conducte din PEHD pentru transportul și distribuția apei, cât și analiza critică a materialelor și tehnologiilor de execuție utilizate la fabricarea țevilor din poli etilenă cu scopul realizării cercetărilor experimentale privind caracteristicile mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte pentru distribuția apei, a cercetărilor teoretice și experimentale privind caracteristicile mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei în prezența defectelor, și a cercetărilor privind estimarea rezervei de capacitate portantă a țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei în prezența defectelor, și a cercetărilor privind estimarea rezervei de capacitate portantă a țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei.

În capitolul 1, denumit "Aspecte generale privind sistemele de conducte din PEHD utilizate la transportul și distribuția apei" sunt prezentate importanța și actualitatea subiectului tezei de doctorat, ce derivă din necesitatea furnizării continue a apei, în condițiile de funcționare variabile, la parametrii nominali, cu eficiență din punct de vedere economic și, din preocuparea de eliminare a pierderilor de apă cauzate de defecte existente în conducte. Conductele alcătuite din țevile extrudate din polietilenă au fost utilizate cu succes de mulți ani pentru transportul în siguranță a apei potabile și reziduale, a deșeurilor periculoase și a gazelor comprimate, dar în prezenta teză de doctorat au fost luate în considerare, cu scopul de a găsi soluții tehnice necesare atingerii obiectivelor menționate anterior, numai conductele pentru transportul și distribuția apei potabile.

În capitolul 2, intitulat "*Analiza critică a materialelor și tehnologiilor de execuție utilizate la fabricarea țevilor din polietilenă*" prezintă obținerea polietilenei – repere istorice și tehnice, ce asigură cunoașterea unui succint istoric al obținerii polietilenei și descrierea instalațiilor utilizate în acest sens. În acest capitol este realizată analiza critică a materialului polietilenă prin tabelul 2.1 și 2.5.

În capitolul 3 cu titlul "Caracteristicile constructive, funcționale și tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă" sunt prezentate elementele necesare identificării dimensionale și funcționale a unei conducte pe baza diametrului nominal și a presiunii nominale. Elementele de tubulatură ale conductelor din polietilenă este subcapitolul în care sunt enumerate și descrise elementele necesare montării rețelelor pentru transportul de fluide în general și pentru apă, în special: fitinguri, armături, reducții etc. Sunt prezentate caracteristicile constructive ale conductelor din polietilenă, în principal diametrul exterior nominal,  $D_e$ , și grosimea de perete nominală, s. În subcapitolul Caracteristicile funcționale ale conductelor din polietilenă sunt prezentate informații tehnice referitoare la presiunea nominală sau presiunea maximă de serviciu,  $P_n$ , la presiunea de operare maximă, MOP, la presiunea de lucru admisibilă,  $P_{adm}$ , și presiunea de încercare,  $P_{inc}$ .

În capitolul 4, având titlul "*Calculul analitic al conductelor din polietilenă subterane*", s-a urmărit prezentarea relațiilor de calcul necesare pentru dimensionare, proiectare, determinarea tensiunilor din peretele țevii etc. În subcapitolul *Dimensionarea conductelor din polietilenă subterane* este explicată aplicarea relației de determinare a grosimii de perete, *s*, în condițiile

cunoașterii diametrului exterior nominal,  $D_e$ , a presiunii interioare,  $P_i$ , și a tensiunii de calcul,  $\sigma_{c1}$ . Prin determinarea stării de tensiuni din peretele țevii se urmărește determinarea succesivă a tensiunii longitudinale, a tensiunii circumferențiale și a stării de tensiuni datorată greutății proprii a țevii, greutății apei din interiorul țevii și dilatării termice. Studiul de caz – Evaluarea analitică a stărilor de tensiuni și deformații specifice țevilor din PEHD dintr-un sistem de conducte destinat distribuției apei – a fost realizat pentru o situație reală, preluată dintr-un șantier pentru montajul unui sistem de alimentare cu apă a centrului comercial pe raza localității Moreni, județul Dâmbovița, sistem de alimentare ce are în componență țevi din polietilenă PE 100 ( $\emptyset$  90 ×5,4), SDR 17.

În capitolul 5 al tezei, intitulat "Cercetări experimentale privind caracteristicile mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte pentru distribuția apei", este redată descrierea unui prim program de testare care a vizat determinarea comportării materialului polietilenă PE100 la solicitarea de întindere monoaxială/tracțiune și determinarea comportării materialului polietilenă PE100 la solicitarea la oboseală. Cercetări le experimentale au fost efectuate cu scopul de a determina caracteristicile mecanice ale polietilenei PE100. Pe baza rezultatele obținute la încercarea la tracțiune și realizarea produsului informatic SPER (Procesarea statistică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results), în programul Excel, cu care s-a analizat comparativ, prin aplicarea metodei Chauvenet, parametrii statistici de grupare: media aritmetică,  $\bar{x}$ , abaterea standard, s, și parametrul de împrăștiere: dispersia, s<sup>2</sup>, aplicați tensiunilor mecanice ale eșantioanelor analizate: 1A1, 2A1, 3A1, 4A1, 1B1 și 3A2.

În capitolul 6, denumit "Cercetări teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei, în prezența defectelor" se prezintă cel de-al doilea program de testare ce a vizat evaluarea comportării la solicitări axiale a țevilor din polietilenă, în prezența defectelor, evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei, în prezența defectelor, evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei, în prezența defectelor, determinarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat și defecte practicate în mod controlat, prin încercarea la presiune interioară, precum și stabilirea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă prin testarea la solicitări multiple.

Tot aici sunt prezentate, cu exemplificări din literatura de specialitate și din încercări experimentale realizate în prezenta cercetare, modurile de rupere a țevilor din polietilenă, respectiv ruperea fragilă și ruperea ductilă. Cu scop comparativ au fost determinate și reprezentate grafic presiunea critică,  $P_{cr}$ , timpul critic,  $t_c$ , și tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ . A fost determinată durata de viață remanentă a țevilor cu defecte practicate în mod controlat, obținându-se valori diferite, respectiv cca. 83 de ani pentru țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) și 69 de ani pentru țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L).

În capitolul 7, cu titlul "*Concluzii. Contribuții originale. Direcții de continuare a cercetărilor*", sunt redate concluzii desprinse din studiile efectuate în cadrul cercetării, sunt precizate contribuțiile originale ce s-au adus, una dintre aceste fiind realizarea unei bibliografii ce cuprinde cărți și articole de specialitate utilizate pe parcursul des fășurării activităților de documentare și cercetare pentru a analiza comportamentul țevilor din polietilenă în general și a influenței defectelor asupra rezistenței mecanice a țevii din polietilenă, în special. Dintre direcțiile de continuare a cercetărilor în domeniu se evidențiază continuarea cercetării durabilității epruvetelor din PEHD supuse încercării la oboseală prin încovoiere rotativă și efectuarea de încercări experimentale pe țevi din PEHD care prezintă defecte dispuse pe suprafața interioară.

*Cuvinte cheie*: polietilenă / polietilenă de înaltă densitate, țevi / conducte, defect, tracțiune, oboseală, tensiune circumferențială, presiune interioară, limita de curgere, rezistența la rupere, alungire procentuală după rupere, durabilitate.

## CAPITOLUL I. ASPECTE GENERALE PRIVIND SISTEMELE DE CONDUCTE DIN PEHD UTILIZATE LA TRANSPORTUL ȘI DISTRIBUȚIA APEI

#### 1.1. Importanța și actualitatea subiectului tezei de doctorat

Subiectul tezei de doctorat prezintă o deosebită importanță datorită faptului că unele utilități, precum transportul și distribuția apei potabile, în prezent, sunt furnizate către consumatori prin intermediul țevilor și elementelor de tubulatură realizate din polietilenă.

În literatura de specialitate se regăsesc studii experimentale și numerice realizate pe subiecte precum:

a) optimizarea proceselor tehnologice de fabricație a țevilor PEHD. În lucrarea [1], aplicându-se tehnologia Life Cycle Assessment (LCA) pentru evaluarea impactului fabricației țevilor PEHD asupra mediului, s-a constat că subsistemele producție și formare-răcire sunt etapele procesului de fabricație cu consumul cel mai ridicat de energie electrică și de apă.

b) studierea deformațiilor cauzate de tensiunile remanente în țevile din polietilena PE100 (polietilena de înaltă densitate cu rezistență la tracțiune minim garantată, *MRS*, de 10 MPa) pe probe inelare tăiate de-a lungul unei generatoare longitudinale.

c) cercetarea factorilor care caracterizează comportarea țevilor din polietilena de înaltă densitate sub acțiunea solicitărilor din exploatare – mecanice, termice și datorate mediilor de lucru – cu scopul elaborării unor modele pentru estimarea cât mai exactă a duratei de viață a conductelor din polietilenă.

d) analiza solicitărilor tubului rectiliniu din material plastic, atât în rețea, cât și la schimbarea de direcție a acestuia (în cot) este realizată în [5].

e) creșterea fiabilității sistemelor tehnice, ce includ componente din materiale termoplastice, prin îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate și optimizarea proceselor de sudare au făcut, de asemenea, obiectul unor studii efectuate pe astfel de structuri [6].

f) dezvoltarea ulterioară a unei metode nedistructive sau de accelerare a determinării stării și speranței de viață a țevilor PE în funcțiune în industria apei, așa cum se arată în [7].

g) analiza influenței solicitărilor asupra stabilității conductelor din polietilenă PE80, SDR 11. [8] a demonstrat că secțiunea transversală a țevii se deformează sub acțiunea presiunii exercitate de sol, din cauza rigidității inelare scăzute a țevilor din polietilenă.

h) Pe primul loc în evaluarea pierderilor de apă se situează conductele din oțel nereabilitate, urmate de conductele din polietilenă, dar care sunt preponderente în alcătuirea rețelei analizate, pe ultima poziție situându-se conductele de oțel care au fost reabilitate.

i) Din cauza frecvenței crescute a spargerilor și a scăderii capacității hidraulice, rețeaua de distribuție a apei necesită lucrări de reabilitare. Prin compararea computerizată a costului înlocuirii fiecărei tevi componente a rețelei se dorește identificarea strategiei optime a soluției costului minim.

j) O metodă privind estimarea duratei de viață remanentă a țevilor din polietilenă, pe baza factorului de intensitate a tensiunii (SIF) și a ecuației Paris-Erdogan, modificată, este prezentată în [11].

k) Proprietățile mecanice utile analizei numerice pentru zona elastică a comportamentului unei epruvete sunt modulul de elasticitate sau modulul lui Young, E, și coeficientul lui Poisson,  $\mu$ . Diagramele tensiune-deformație sunt utilizate pentru analiza din domeniul plastic, iar analiza din domeniul visco-plastic se bazează pe parametrii legii puterii pentru fluaj.

 Analiza cedării ductile, care apare în cazul denumit "cioc de papagal", este demers realizat prin simularea numerică pe modelul ce prezintă fisură dispusă oblic. Soluțiile simulării numerice au fost tensiuni şi deformații cauzate de presiunea interioară la care este supusă o țeavă componentă a unei rețele de distribuție a apei.

În prezenta teză de doctorat, se propun metode de analiză și se prezintă rezultatele obținute în urma parcurgerii unui program de cercetare care a vizat problematica defectelor și influenței acestora asupra rezistenței mecanice a conductelor din polietilenă.

Actualitatea subiectului tezei de doctorat este susținută și de evoluția materialului "polietilenă (PE)". Generația actuală a materialelor – polietilenă de înaltă densitate – clasificate ca PE 4710 de către standardele din U.S. și Canada și PE100 de către standardele ISO, prezintă rezistență îmbunătățită la creșterea lentă a fisurilor și la oboseală [15].

Având în vedere elementele mai sus prezentate, se poate considera că tema tezei de doctorat este una de actualitate, scopul final al cercetărilor fiind acela de a evidenția influența defectelor asupra rezistenței mecanice a țevilor din polietilenă.

#### 1.2. Avantajele utilizării conductelor din polietilenă în rețelele de alimentare cu apă

Conductele din PEHD sunt utilizate în diverse aplicații, precum: furnizarea apei sub formele: potabilă, distribuție, magistrală de apă, conducte de serviciu.

Conductele de drenaj (apă din subsol, apă de suprafață și din ploaie, magistrală de apă uzată) sunt constituite din țevi și elemente de tubulatură PEHD.

Utilizarea țevilor și elementelor de tubulatură din polietilenă la realizarea sistemelor de conducte pentru transportul și distribuția apei oferă următoarele avantaje: greutate redusă, instalare mai simplă și cu un cost mult mai scăzut decât al altor alternative.

Faptul că materialul PE nu este toxic recomandă utilizarea conductelor din polietilenă la transportul apei potabile și a lichidelor alimentare.

Comparativ cu țevile din oțel, țevile PEHD nu sunt supuse fenomenului de coroziune, tuberculație sau creștere de suport biologic. Tuberculația reprezintă, conform [19], un tip de coroziune cauzată de microorganisme în mediul conductei, care se hrănesc cu fierul și manganul din apă, rezultând acumularea de subproduse care se depun ca o peliculă de biomasă ce poate avea efecte adverse asupra conductei: reducerea diametrului intern efectiv al țevii și, implicit, reducerea capacității de curgere și creșterea presiunii în conducte și chiar echipamente de pompare deteriorate.

## **1.3.** Solicitări ale conductelor utilizate la alimentarea cu apă și elemente de calcul specifice

Cunoașterea modificărilor caracteristicilor polietilenei, ca rezultat al aplicării solicitărilor mecanice, reprezintă un element necesar în realizarea calculului mecanic al conductelor.

Solicitările mecanice la care sunt supuse țevile din polietilenă sunt variate. Acestea se pot diferenția în funcție de momentul aplicării lor, astfel:

a) solicitări mecanice din timpul procesului de fabricație;

- b) solicitări mecanice din timpul ambalării, manipulării, transportului și depozitării;
- c) solicitări mecanice din timpul instalării, reabilitării sau înlocuirii și montajului;
- d) solicitări din timpul exploatării.

#### 1.3.1. Solicitări manifestate în timpul procesului de fabricație

Prin tăiere, la capătul țevii acționează o forță axială, N, și un moment încovoietor, M, ce au valori constante pe grosimea de perete și determină apariția tensiunilor reziduale [8].

## 1.3.2. Solicitări manifestate în timpul ambalării, manipulării, transportului și depozitării

În procesul de ambalare al țevilor din polietilenă, acestea sunt supuse unor solicitări de încovoiere care au efect ovalizarea. Pentru țevile livrate în tronsoane drepte, maximul valorilor absolute al ovalității este cuprins în intervalul 2,2 ... 22,1 mm.

Modul necorespunzător de manipulare a țevilor din polietilenă poate provoca deteriorarea acestora prin zgâriere, înțepare sau găurire.

Transportul țevilor/tuburilor sau colacilor se realizează pe platforme speciale. În cazul țevilor, lungimea platformei trebuie să fie cel puțin egală cu lungimea țevilor. Fixarea și rigidizarea pachetelor de țevi sau de colaci, cu scopul evitării deteriorării acestor pe timpul transportului, sunt condiții impuse.

Depozitarea necorespunzătoare a țevilor din polietilenă PE, în stive cu înălțime mai mare de 1,5 m, poate determina ovalizarea acestora. În general, depozitarea corespunzătoare în șantier a țevilor de polietilenă PE se poate prezenta ca în figura 1.1.



Fig. 1.1. Depozitarea corespunzătoare în șantier a țevilor din polietilenă PE

#### 1.3.3. Solicitări manifestate în timpul instalării, reabilitării sau înlocuirii și montajului

Instalațiile îngropate de conducte din polietilenă utilizate pentru transportul și distribuția apei implică, în general, excavarea șanțului, plasarea țevii în șanț, plasarea rambleului de înglobare în jurul conductei și plasarea umpluturii la gradul final necesar [21].

Solicitările la care sunt supuse țevile din polietilenă în etapele de instalare și reabilitare sau înlocuire sunt de încovoiere la lansare, de tracțiune la tragere și de compresiune la împingere, solicitări ce pot determina o concentrație a deformării locale.

La montaj, o atenție deosebită trebuie acordată îmbinării termice. Din cauza neomogenității proprietăților materialului, concentrarea tensiunii este exact în centrul sudurii, aceasta reprezentând o posibilă zonă de inițiere a fisurilor.

#### 1.3.4. Solicitări manifestate în timpul exploatării

Conductele îngropate constituite din tubulatură din polietilenă PE100 sunt supuse următoarelor sarcini:

- modificări zilnice și/sau sezoniere de temperatură;
- interacțiunea solului;
- sarcini suplimentare din trafic;
- presiunea fluidului din interiorul conductelor;
- sarcini rezultate din configurația traseului;
- solicitări cauzate de orice atașament exterior al conductelor [23].

#### 1.3.4.1. Solicitări datorate modificărilor zilnice și/sau sezoniere de temperatură

Dilatarea termică a conductei cauzate de diferențele de temperatură sezoniere, înregistrate în sol, determină, de asemenea, solicitări complexe care creează în tubulatura conductei din polietilenă PE tensiuni axiale și circumferențiale, de încovoiere și de torsiune.

#### 1.3.4.2. Solicitări datorate interacțiunii conductei din polietilenă cu solul

Conductele de polietilenă sunt utilizate, în general, în regim îngropat. Solul are acțiune abrazivă, de amprentare a conductei din polietilenă.

Sub acțiunea greutății stratului de pământ, țeava din polietilenă se ovalizează. Conform [8], asupra țevilor îngropate din polietilenă PE, în special a celor nepresurizate la interior, presiunea

exercitată de sol produce forțe de compresiune în peretele țevii, ce pot determina pierderea stabilității acestuia.

Forma secțiunii transversale a țevii deformate, sub formă de elipsă, este redată în figura 1.3.



Fig. 1.3. Forma secțiunii transversale a țevii deformate, sub formă de elipsă

#### 1.3.4.3. Solicitări datorate suprapresiunii din trafic

O sarcină suplimentară pentru conductele din PE îngropate o reprezintă suprapresiunea cauzată de trafic,  $P_t$ . Acestea reprezintă o sarcină dinamică, variabilă, periodică.

#### 1.3.4.4. Solicitări variabile specifice funcționării conductelor din polietilenă

Una dintre cauzele cedării țevilor din PEHD este *oboseala* datorată încărcărilor ciclice, variabile în dimensiune și frecvență, la care sunt supuse, precum presiunea interioară, sarcini de greutate sau solicitări exterioare pe țevi îngropate, care generează tensiuni în diferite direcții: circumferențială, longitudinală și radială, [33].

Din punct de vedere comportamental, în [33] și [34], se precizează că încărcarea epruvetei la o frecvență mai mare în timpul încercării la oboseală determină o creștere rapidă a temperaturii. Acest fenomen are ca efect slăbirea materialului și scăderea duratei de viață a epruvetei, deoarece PEHD nu are o conductivitate termică ridicată (nu este un bun disipator de energie).

#### 1.3.4.5. Solicitări cauzate de alunecări de teren

Sub acțiunea alunecării de teren țeava din polietilenă prezintă îndoire și aplatizare locală sau ovalizare a secțiunii transversale a țevii care poate fi exprimată printr-o mărime adimensională denumită de [29], *parametru de aplatizare*, *f*, definit conform relației 1.10.

$$f = \frac{\Delta D}{D} \tag{1.10}$$

în care:

 $\Delta D = D_V - D$  sau  $\Delta D = D_O - D$  este schimbarea maximă de diametru.

O limită a ovalizării secțiunii de distribuție este considerată ca acceptată când parametrul de aplatizare, f, devine 20 %.

#### 1.3.4.6. Solicitări datorate presiunii fluidului din interiorul conductei

Presiunea interioară,  $P_i$ , produce, conform [36], tensiuni în peretele țevii manifestate atât în direcție axială, cât și în direcție circumferențială. Din aplicațiile practice, s-a stabilit că tensiunea circumferențială este aproximativ dublă celei axiale/longitudinale. Aceasta determină propagarea fisurii în direcția axială/longitudinală.

Presiunea fluidului transportat produce, în peretele țevilor, deformații diferite în direcție axială, circumferențială și radială.

#### 1.3.4.7. Solicitări cauzate de discontinuitățile locale

Creșterea bruscă a presiunii lichidului transportat prin conductele din PE, ca urmare a reducerii rapide a vitezei de curgere este denumită *șoc hidraulic* sau *lovitură de berbec* [38].

#### 1.3.4.8. Solicitări cauzate de atașamente exterioare ale conductei

Pentru închiderea, reglarea, siguranța, distribuția, reținerea fluidului transportat prin conducte sunt montate, pe acestea, diverse fitinguri. Acestea, fiind părți componente ale conductei, sunt solicitate la aceleași sarcini.

#### 1.4. Concluzii

În capitolul **1. ASPECTE GENERALE PRIVIND SISTEMELE DE CONDUCTE DIN PEHD UTILIZATE LA TRANSPORTUL ȘI DISTRIBUȚIA APEI** sunt redate informații necesare pentru înțelegerea solicitărilor mecanice la care sunt supuse țevile și elementele de tubulatură din componența conductelor din polietilenă utilizate la distribuția apei.

1. Pentru solicitările mecanice din timpul procesului de fabricație sunt caracteristice forța axială, N, și momentul încovoietor, M, ce acționează la capătul țevii, prin tăiere, precum și tensiunile reziduale determinate de acestea.

2. Solicitarea mecanică la care sunt supuse țevile din polietilenă în timpul ambalării, manipulării, transportului și depozitării este de compresiune și are ca efect ovalizarea acestora.

3. În timpul etapelor de instalare, reabilitare sau înlocuire, și montaj, asupra țevilor din componența conductei din polietilenă acționează solicitări de încovoiere la lansare, de tracțiune la tragere și de compresiune la împingere, solicitări ce pot determina o concentrație a deformației conductei.

4. Solicitările din timpul exploatării, enumerate în subcapitolul 1.3.4., determină modificări ale țevilor din polietilenă sub forma deformațiilor exterioare sau interioare finite. Dilatarea termică determină apariția în peretele țevilor din polietilenă a tensiunilor axiale și circumferențiale, de încovoiere și de torsiune.

5. Presiunea exercitată de sol asupra țevilor îngropate produce forțe de compresiune ce pot determina pierderea stabilității. De asemenea, peretele țevii îngropate este supus unei duble solicitări, la compresiune și încovoiere.

6. Suprapresiunea cauzată din trafic supune țeava îngropată la presiune verticală, echivalentă cu o încărcare liniară.

7. Conductele din polietilenă sunt supuse solicitărilor variabile ce pot determina degradarea conductelor prin fenomenul de oboseală.

8. Cutremurul solicită conductele din polietilenă îngropate ca o sarcină dinamică, aplicată prin șoc, iar efectul manifestării sarcinii respective determină îndoire și aplatizare locală sau ovalizare.

9. Presiunea interioară produce tensiuni în peretele țevii. Acestea se manifestă atât în direcție axială, cât și în direcție circumferențială.

## CAPITOLUL 2. ANALIZA CRITICĂ A MATERIALELOR ȘI TEHNOLOGIILOR DE EXECUȚIE UTILIZATE LA FABRICAREA ȚEVILOR DIN POLIETILENĂ

Fabricarea țevilor din polietilenă de culoare neagră cu linii coextrudate de culoare albastră, destinate sistemelor de transport și distribuție a apei, reprezintă preocupare colectivă și permanentă. Începând cu obținerea prin polimerizare a materiei prime, denumită *etilenă*, și finalizând cu acordarea Certificatului de conformitate în sistem integrat de management al calității ISO 9001 a produsului final – țeavă, fiecare etapă este riguros controlată.

Utilizând analiza multicriterială prin metoda FRISCO pentru studiul comparativ a cinci tipuri de țeavă fabricate din materiale precum: fontă (CI), fier ductil (DI), polietilena de înaltă densitate (HDPE), azbociment (AC) și policlorura de vinil (PVC), analiză bazată pe 22 de criterii de evaluare, s-a constatat că polietilena HDPE întrunește cel mai ridicat punctaj, respectiv 218,78.

#### 2.1. Obținerea polietilenei – repere istorice și tehnice

Structura de bază a țevilor de polietilenă este constituită din *materia primă* și materiale auxiliare sau *aditivi*.

*Materia primă* utilizată la fabricarea țevilor din polietilenă este rășina termoplastică denumită *polietilenă*. Aceasta, la rândul ei, are ca moleculă de bază monomerul *etilenă* (de puritate până la 98 %) obținută din gaze petroliere.

Dezvoltarea polietilenei s-a realizat la 30 de ani după obținerea, de către savantul rus G.G. Gustavson, a moleculelor mai mari de etilenă, în anul 1879 [42].

În România, polietilena a fost obținută, pentru prima dată, într-o stație pilot, în cadrul uzinei ICECHIM-Dudești. Aici se aplica producerea de polietilenă cu catalizatori din amil-sodiu, sub îndrumarea acad. C.D. Nenițescu, conducătorul științific al colectivului. Schematizat, instalația de producere a polietilenei este redată în figura 2.2. Procedeul de fabricare al polietilenei de înaltă densitate este descris astfel: etena/etilena, separată din gazele de prelucrarea țițeiului, se introduce într-un gazometru, de unde intră într-un compresor care o comprimă la circa 2000 atm. și o îndreaptă spre un reactor tubular în care, la temperatura de 200 °C, se polimerizează. Etena/etilena nereacționată se recirculă, iar polietilena se separă, se răcește și, după ce se granulează, este trimisă la prelucrare mecanică [46].



Fig. 2.2. Instalația ICECHIM-Dudești de producere a polietilenei (prelucrare după [46])

*Materialele auxiliare* sau *aditivii* utilizați pentru fabricarea țevilor din polietilenă - în proporție de 5 ... 7% [47] - sunt substanțe care se utilizează în sinteza polimerilor cu rolul de mijlocitori ai reacțiilor de polimerizare, pentru declanșarea reacțiilor, creșterea vitezei de

polimerizare și dirijarea proprietăților intrinseci ale polimerilor. În practică se utilizează două grupe mari de aditivi: antioxidanții și pigmenții [48, 49], ....

Caracteristica fizică a polietilenei precizată în sursa [46] este densitatea,  $\rho$ , de 820-950 kg/m<sup>3</sup>, fiind considerată una din masele plastice cele mai ușoare. Referitor la proprietățile flexibile ale polietilenei, în [46] se susține că aceasta și le pierde numai sub -80 °C.

Cele trei caracteristici de bază care influențează major proprietățile de procesare și utilizare finală: densitatea, greutatea moleculară și distribuția greutății moleculare [24].

Societatea Americană pentru Testarea Materialelor/American Society for Testing of Materials (ASTM), a clasificat diferitele categorii de PE în funcție de densitatea rășinii. În acest scop, în lucrarea [20] a fost poziționată PEHD ca fiind tipul III, cu densitatea cuprinsă în intervalul 941–959 kg/m<sup>3</sup> [24]. Pentru polietilenă de înaltă densitate, produsă pentru prima dată în anul 1990, densitatea este 950–965 kg/m<sup>3</sup> [14].

Densitatea influențează direct o serie de proprietăți, sensul variației acestora fiind următorul: cu creșterea densității crește duritatea, rigiditatea și rezistența la tracțiune și scade alungirea la rupere, rezistența la șoc, permeabilitatea la vapori de apă [53].

Polietilena, utilizată la fabricarea țevilor, prezintă schimbări ale caracteristicilor în funcție de factori fizici și chimici, modificări prezentate în [55].

#### 2.1.1. Caracteristicile mecanice ale polietilenei

Încercările mecanice necesare pentru determinarea proprietăților de material, precum proprietățile de scurtă durată (rezistență, duritate, ductilitate, rigiditate, tenacitate) și proprietățile de lungă durată (fluaj, relaxare, oboseală), analizele chimice și examinările de structură, sunt determinări realizate cu scopul cunoașterii anumitor moduri de comportare a materialelor plastice, în condiții de solicitare mecanică, stabilite în mod convențional prin standarde.

Metoda de evaluare experimentală, de tip încercare de scurtă durată, realizată sub solicitare statică, unică, progresivă, este reglementată prin standardul ISO 527-1 [56].

Prin încercarea la tracțiune se pot determina două tipuri distincte de evoluție a comportării materialului:

a) *Curba epruvetei*, în coordonate  $F - \Delta l(F)$ , care se trasează utilizând datele primare obținute la încercarea la tracțiune referitoare la forța aplicată, F, și lungirea corespunzătoare forței aplicate,  $\Delta l(F)$ ;

b) Curba tensiune-alungire (deformație specifică) axială la întindere, în coordonate  $\sigma - \varepsilon$ , denumită Curba caracteristică convențională la tracțiune (CCCT), vezi figura 2.3.



Fig. 2.3. Curba convențională caracteristică la tracțiune: a. specifică polimerilor densitate (preluare din [58]); b. specifică polietilenei de înaltă

Curba caracteristică convențională la tracțiune (CCCT) se obține, în mod convențional, în coordonate raport convențional  $R = F/S_0$ , în care  $S_0$  este valoarea secțiunii inițiale a epruvetei, care înlocuiește tensiunea  $\sigma = F/S$ , din motiv că este foarte dificilă măsurarea secțiunii epruvetei pe toată lungimea și pe toată durata încercării, și alungire totală,  $\varepsilon_t$ , ( $\varepsilon_t = 100 \cdot (L_u - L_0)/L_0 = 100 \cdot \Delta L/L$  [%]), deoarece deformația specifică,  $\varepsilon$ , nu este constantă pe lungimea epruvetei în tot timpul încercării.

În tabelul 2.5 sunt prezentate valorile proprietăților mecanice ale principalelor materiale utilizate pentru transportul și distribuției apei potabile, la temperatura de 23 °C [68].

·								
Denumire	Standard	Modulul de	Limita	Alungirea	Rezistența	Alungirea	Raportul	
material		elasticitate,	de	la limita	la	procentuală	lui Poisson,	
		E. [MPa]	curgere.	de	rupere.	după	u.[-]	
			σ <sub>v</sub> , [MPa]	curgere,	$\sigma_r$ , [MPa]	rupere,	F71 3	
			,	ε, [%]		$\varepsilon_r, [\%]$		
PVC-U <sup>1</sup>	DIN 8061	1000 - 3500	50 - 60	4 - 6	50 - 75	10 - 50	0,33	
PE100	ISO 4427-2	600 - 1860	11 - 30	8-12	18 - 35	100 - 1000	0,38 - 0,50	
<b>PB-1</b> <sup>2</sup>	DIN 16968	250 - 350	12 - 25	10	27 - 38	250 - 350	0,34	
X2CrNiMo17-	EN 10217-7	200	240 - 570	35	85	14 - 43	0,28	
$2-2(1.4404)^3$								
Fontă ductilă	ISO 8329	166713			420	10	0,275	

**Tabelul 2.5.** Valorile proprietăților mecanice ale principalelor materiale utilizate pentru transportul și distribuția apei potabile

<sup>1</sup> PVC-U – Policlorură de vinil neplastifiată

<sup>2</sup> PB-1 – Polibutenă

<sup>3</sup> X2CrNiMo17-2-2 (1.4404) – Otel inoxidabil cu nr. 1.4404

#### 2.1.2. Particularitățile comportării la oboseală a polietilenei

Din punct de vedere structural, în [64] se precizează influența greutății moleculare și a gradului de cristalizare sau a concentrației de molecule de legătură asupra caracteristicilor la oboseală ale PEHD.

Comportamentul specific la oboseală al materialelor plastice este determinat, în esență, de comportamentul tipic al structurii polimerice remarcat pe curba tensiune-deformație [69]. În plus, este remarcat efectul semnificativ al factorilor externi, precum: tensiuni principale, frecvența solicitărilor, forma și istoria încărcării (histerezis), asupra comportamentului la oboseală a polietilenei de înaltă densitate.

Țevile din PEHD, utilizate la transportul și distribuția apei potabile, sunt, în mod frecvent, solicitate la încărcări ciclice și oscilante provocate de schimbarea rapidă a vitezei fluidului transportat prin țeavă, care poate fi produsă de supapele în funcțiune, pornirea și oprirea pompei, ventilarea aerului, separarea coloanei de fluid și alte operațiuni [70].

Încercarea la oboseală evaluează efectul solicitărilor variabile, deterministice, periodice, caracterizate prin faptul că tensiunile create în interiorul unui corp solicitat variază în mod ciclic, fără discontinuități, între două valori limită, respectiv tensiunea maximă,  $\sigma_{max}$  și tensiunea minimă,  $\sigma_{min}$ .

În cadrul încercării la oboseală prin încovoiere rotativă, tensiunile induse în interiorul corpului solicitat la o rotație completă variază după un ciclu de solicitare simetric. Elementele ciclului de solicitare simetric sunt: tensiunea maximă,  $\sigma_{max}$ , tensiunea minimă,  $\sigma_{min}$ , tensiunea medie,  $\sigma_m$ , amplitudinea ciclului,  $\sigma_a$ , și coeficientul de asimetrie, *R*. Specifice ciclului simetric sunt valori pentru tensiunea medie,  $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2 = 0$  și pentru coeficientul de asimetrie,  $R = (\sigma_{min}/\sigma_{max}) = -1$ . Reprezentarea grafică a ciclului simetric în coordonate: tensiune mecanică,  $\sigma$ , în funcție de timp, *t*, este redată în figura 2.4*a* și în coordonate: tensiune mecanică,  $\sigma$ , în funcție de alungire sau deformație specifică,  $\varepsilon$ , este redată în figura 2.4*b* (căreia îi corespunde o buclă denumită *buclă de histerezis*).



*Fig. 2.4. Reprezentarea grafică a ciclului simetric: a)* în coordonate  $\sigma - t$ ; *b)* în coordonate  $\sigma - \varepsilon$ 

Conform [74], standardul ISO 1143 [73] reprezintă standardul ce se aplică și materialelor plastice. Acesta stabilește metoda și condițiile pentru testare, cu cicluri alternant-simetrice de amplitudine constantă, pe epruvete cu diametrul cuprins între 5 și 12,5 mm fără concentratori de tensiune, în condițiile atmosferei standard normale de încercare ISO 554 [75].

Procedura experimentală de aplicare a încercării la oboseală prin încovoiere rotativă precum și rezultatele obținute din testarea în conformitate cu aceasta a epruvetei realizată din PE100 au fost prezentate în [**76**].

Prin încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă se determină în mod obișnuit următoarele caracteristici: rezistența la oboseală, rezistența la durabilitate limitată, limita de oboseală.

Rezistența la oboseală sau rezistența la solicitări maxime,  $\sigma_R$ , reprezintă cea mai mare valoare a tensiunii maxime la care epruveta nu se rupe, oricât de mare ar fi numărul de cicluri la care este supusă [77]. Această caracteristică de material este notată cu simbolul  $\sigma$  și are ca indice valoarea coeficientului de asimetrie, R.

Cu perechile de date ( $\sigma_{max i}$ ,  $N_i$ ) se trasează *curba lui Wöhler* sau *curba de durabilitate*. Numărul de cicluri până la care se realizează încercările pentru epruvetele care nu se rup se notează cu  $N_0$ . Rezistența la oboseală,  $\sigma_R$ , reprezintă asimptota orizontală la curba lui Wöhler sau curba de durabilitate.

Pentru o mai bună interpretare a rezultatelor încercării la oboseală se utilizează reprezentarea în coordonate semilogaritmice  $\sigma_{max}$ , log N a curbei lui Wöhler. (vezi figura 2.5b). Pe curba lui Wöhler reprezentată în coordonate semilogaritmice se disting trei domenii: I – zona solicitărilor statice cu un număr mic de cicluri; II – zona durabilității limitate și III – zona durabilității nelimitate (zona rezistenței la oboseală).



Fig. 2.5. Curba lui Wöhler:

a) poziționarea rezistenței la oboseală,  $\sigma_R$ , pe curba lui Wöhler; b) reprezentarea în coordonate semilogaritmice (prelucrare după [77])

Frecvența și totalitatea evenimentelor de oboseală afectează gradul și rata la care materialul PE suferă deteriorări ireversibile [24]. Numărul modificărilor de sarcină din perioada de 50 de ani,

ce reprezintă durata de viață estimată, poate fi estimat pe baza pornirii sau opririi pompelor chiar și în zece minute.

Pentru polietilenă, mecanismul de oboseală – care duce la pierderea rezistenței mecanice pe termen lung – este cel al dezvoltării inițiale a microfisurilor care, sub efectul fiecărui ciclu al încărcării oscilante cresc încet, ajungând în stadiul de fisuri [24].

În tabelul 2.6 sunt redate condițiile încercărilor pentru determinarea a rezistenței la oboseală,  $\sigma_R$ , a materialelor PE4710 și PE100 (tratate ca materiale omoloage) și rezultatele obținute.

Amplitudinea	Tensiunea	Presiune de	Numărul de	Temperatura	Surse de			
ciclului de	circumferențială	încercare	cicluri de	de încercare,	referință			
solicitare,	înregistrată,	echivalentă,	solicitare,	[ <sup>0</sup> C]				
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]					
10	-	$1,5 \times PC^*$	107	23	[78]			
12	+ 8/- 4	$1,16 \times PC^*$	106	23	[14]			
3,5	-	$1,5 \times PC^*$	$1,6 \times 10^{9}$	20	[79]			

**Tabelul 2.6.** Date referitoare la determinarea rezistenței la oboseală,  $\sigma_R$ , a materialului PE

\* PC – Clasa de presiune

Conform [70], "materialul polietilenă PE100, cu rezistență ridicată, nu este aparent afectat de încărcările ciclice repetate".

#### 2.1.3. Evaluarea caracteristicilor de fluaj ale polietilenei

Natura vâscoelastică a polietilenei provine din două caracteristici inginerești unice: fluajul și relaxarea, care sunt utilizate în proiectarea sistemelor de conducte din PEHD pentru transportul și distribuția apei [21].

Fluajul este o importantă caracteristică mecanică a polietilenei ce trebuie luată în considerare la proiectarea țevilor solicitate pe termen lung [24].

Polimerii prezintă proprietăți mecanice diferite în funcție de intervalul de temperatură la care sunt utilizați. Comportamentul acestora este analizat prin caracteristici cum ar fi: fluajul și relaxarea, ruperea fragilă, gâtuirea și laminarea la rece.

Comportamentul la fluaj este un fenomen dependent de timp care se manifestă sub acțiunea unei sarcini statice. Este caracterizat prin deformarea continuă a materialului, ca urmarea a rearanjării moleculare. Gradul de deformare depinde de o serie de factori, printre care: tipul materialului, tensiunea aplicată, temperatura și timpul de expunere la sarcină [80].

Materialele termoplastice sunt materiale vâscoelastice; rezistența și deformarea lor sub tensiune sunt dependente de durata încărcării [57]. În baza comportamentului de dependență deformație-timp, polietilena este denumită *material vâscoelastic*. Acest aspect presupune determinarea unei noi ecuații de dependență deformație-timp pentru o nouă valoare a tensiunii.

Conform [12], analiza comportamentului de natură vâsco-plastică al polietilenei (dependența de timp sau de deformație) se bazează pe legea puterii fluajului, conform căreia deformația vâscoelastică la fluaj,  $\varepsilon^{f}$ , este definită prin relația (2.2).

$$\varepsilon^f = A\sigma^n t^m \tag{2.2}$$

în care:

A,  $n \neq m$  – constante de material dependente de temperatură.În tabelul 2.8 sunt redate proprietățile mecanice de fluaj ale materialului extrudat polietilenă (PE) conform [87].

Denumirea proprietății.		Condiții ex	Valori determinate		
simbolul și unitatea de măsură	Metoda/ Standard	Temperatura, [°C]	Sarcina inițială aplicată, [MPa]	și/sau publicate în literatura de specialitate	
Modulul la fluaj, <i>E</i> tc <sup>1</sup> , MPa		22		670 - 1200, la 1 oră	
Modulul la fluaj, $E_{tc}10^3$ , MPa	[85]	23	-	340 - 680, la 1000 ore	

Tabelul 2.8. Proprietățile mecanice de fluaj ale materialului extrudat polietilenă (PE) [87]

#### 2.2. Considerații teoretice privind tehnologiile de fabricare ale țevilor din polietilenă

Polietilena (PE) este unul dintre cele mai utilizate materiale termoplastice. Utilizarea sa pentru fabricarea tubulaturii de conducte a debutat la începutul anilor 1950. Tuburile din PE se obțin prin extrudare, o tehnică de transformare a materiilor prime termoplastice, care permite obținerea continuă de produse finite [88].

*Țevile monostrat/monotub* (netede) PE100 extrudate din polietilenă sunt produse pe instalații de extrudare complet automatizate, precum cea din figura 2.12 [24], iar schema de principiu a unei linii de extrudare pentru țevile de PEHD este redată în figura 2.13.



Fig. 2.12. Instalația de extrudare (preluare din [24])



Fig. 2.13. Schema de principiu a unei linii de extrudare pentru țevile din PEHD: 1 – motor electric de antrenare, 2 – buncăr de dozare, 3 – extruder, 4 – șurub transportor elicoidal, 5 – manșoane de încălzire electrice, 6 – dispozitiv filieră-poanson, 7 – dispozitiv de calibrare, 8 – baia de răcire, 9 – dispozitiv de tractare (prelucrare după [89])

*Țevile multistrat* PE100/PE100 RC conțin cel puțin două straturi: un strat interior, realizat din plastic extrudat precum polietilena PE, și un strat exterior, constituit dintr-un material plastic, de asemenea extrudat în matricea căruia s-a adăugat un agent de spumare, cu are rol de întărire, și un aditiv, ce are funcție ignifugă [48].

### 2.3. Concluzii

În capitolul **2. ANALIZA CRITICĂ A MATERIALELOR ȘI TEHNOLOGIILOR DE EXECUȚIE UTILIZATE LA FABRICAREA ȚEVILOR DE POLIETILENĂ** sunt prezentate rezultatele analizei efectuată, pe baza literaturii de specialitate, în ceea ce privește materiile prime utilizate la fabricarea țevilor din polietilenă, caracteristicile fizice și mecanice ale acestora, precum și tehnologiile de execuție utilizate la fabricarea lor.

1. Pornind de la un scurt istoric al materiei prime, denumită polietilenă, în care se regăsesc și prezentările schematizate ale primelor instalații de producere a acesteia, și continuând cu enumerarea și descrierea succintă a aditivilor, conținutul subcapitolului 2.1. redă structura unică de bază a materialului polietilenă utilizat la fabricarea prin extrudare a țevilor de polietilenă.

2. Caracteristicile mecanice ale polietilenei au valori diferite în funcție de viteza de testare și rata deformației și aceste valori, evidențiate de literatura de specialitate, sunt redate în tabelele 2.4, 2.5 și 2.7.

3. Dintre avantajele utilizării țevilor din HDPE pot fi enumerate:

- impactul negativ redus asupra mediului;
- > menținerea integrității în condiții de cutremur;
- risc redus de formare de biofilm sau de biomasă;
- > procesul de îmbătrânire a țevilor este foarte lent.

4. Pe baza densității, ρ, de 820-950 kg/m<sup>3</sup>, polietilena este considerată una din masele plastice cele mai ușoare. Creșterea densității determină creștea durității, a rigidității și a rezistenței la tracțiune și scăderea alungirii la rupere, a rezistenței la șoc, a permeabilității la vaporii de apă.

7. Dintre încercările experimentale la care este supus materialul polietilenă în vederea determinării caracteristicilor mecanice, sunt prezentate încercarea la tracțiune, încercarea la oboseală și încercarea de determinare a comportamentului materialului la fluaj.

8. Caracteristicile mecanice ale semifabricatelor din polietilenă – sub forma țevilor, în cazul de față - precum rezistența, duritatea, ductilitatea, rigiditatea, tenacitatea (proprietăți de scurtă durată) și fluajul, relaxarea, oboseala (proprietățile de lungă durată) sunt determinate prin încercări experimentale reglementate prin standarde corespunzătoare.

11. Spre deosebire de majoritatea materialelor cu comportament elastic sau aproape elastic, deformațiile polietilenei nu sunt proporționale cu tensiunile aplicate. De asemenea, deformarea depinde de durata solicitării.

În cazul încercării la tracțiune, determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor prelucrate din eșantioane prelevate din materialul țevii se recomandă din următoarele motive:

- stabilirea limitei de elasticitate a materialului (punctul *B* al CCCT) deoarece, după depășirea acestei limite, materialul începe să capete deformații plastice (remanente);
- determinarea sarcinii pentru care porțiunea finală rectilinie extrapolată la "durata de viață" necesară să prezinte o deformație sub cea maximă admisibilă.

Determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor prelucrate din eșantioane prelevate din materialul țevii prin încercarea la oboseală este recomandată deoarece asigură răspunsul solicitărilor reale la încărcări ciclice și oscilante provocate de schimbarea rapidă a vitezei fluidului transportat prin țeavă, care poate fi produsă de supapele în funcțiune, pornirea și oprirea pompei, ventilarea aerului, separarea coloanei de fluid și alte operațiuni.

Încercarea la fluaj, prin determinarea caracteristicilor mecanice caracteristice, vizează atingerea următoarelor obiective:

- interpretarea comportamentului mecanic al polietilenei pe baza deformațiilor care apar sub încărcare;
- > determinarea variației deformațiilor cu timpul, sub tensiune și temperatură constantă.

## CAPITOLUL 3. CARACTERISTICILE CONSTRUCTIVE, FUNCȚIONALE ȘI TEHNOLOGICE ALE TUBULATURII CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ

Conductele din polietilenă pot fi considerate complet definite prin precizarea caracteristicilor constructive, funcționale și tehnologice ale elementelor de tubulatură și de conexiune care le alcătuiesc.

#### 3.1. Clasificarea conductelor sub presiune

Criteriile de clasificare a conductelor sub presiune se referă, în special, la tipul de material din care sunt fabricate, la natura fluidelor transportate, la soluții posibile de amplasare a lor în teren, la metodele de conexiune între elementele de tubulatură, la utilizare etc.

Dintre criteriile de clasificare ale conductelor sub presiune enumerate mai sus, cele mai frecvent utilizate sunt:

1. *după tipul de material din care sunt fabricate*. Conform NP 133-2022 [90], conductele fabricate din "*polietilenă de înaltă densitate* (PEHD) sunt utilizate pentru sistemele de alimentare cu apă, alături de conducte fabricate din fontă ductilă, oțel, beton armat precomprimat (PREMO), polietilenă rezistentă la fisurare (PEHD RC), poliesteri armați cu fibră de sticlă și inserție de nisip (PAFSIN) și policlorură de vinil orientată molecular (PVC-O)";

2. *după natura fluidelor transportate*. Conductele din polietilenă sunt utilizate pentru transportul apei potabile și a gazelor naturale, apelor uzate etc.

3. *după soluțiile posibile de amplasare în teren*. Soluțiile posibile de amplasare în teren a conductelor sub presiune sunt: suprateran, subteran/îngropat sau suspendat. Conductele din polietilenă utilizate pentru transportul apei potabile sunt amplasate subteran/îngropat.

4. *după metodele de conexiune între elementele de tubulatură*. Cu scopul de a constitui conducta din polietilenă utilizată pentru distribuția apei potabile, conexiunile dintre elementele de tubulatură sunt realizate prin metode precum: îmbinare prin fuziune cap la cap, îmbinare prin electrofuziune, îmbinare filetată și îmbinare cu flanșă.

5. *după domeniile de utilizare*. Țevile din polietilenă au denumire, compoziție, culoare (atât a țevii cât și a benzii coextruse) și inscripționare specifică utilizării.

În cazul cel mai general, în cadrul unui sistem de conducte, pot fi identificate patru componente majore: elementele de conductă, protecțiile, suporturile și aparatura. Schematizat, elementele componente ale unui sistem de conducte sunt redate în figura 3.2 [91].



Fig. 3.2. Elementele componente ale unui sistem de conducte (preluare din [91])

Un sistem de distribuție a apei potabile este constituit, în general, dintr-o magistrală de transport, denumită și linie/conductă de alimentare primară, și linii de serviciu, alcătuite la rândul lor *Ing. Ioana-Daniela Manu* 29

dintr-o serie de conducte cu diametre care se micșorează treptat, denumite și racorduri de branșament [92].

Configurația rețelei de distribuție a apei potabile realizată cu țevi din polietilenă de înaltă densitate (PEHD) și denumirea elementelor componente sunt redate în figura 3.3.



Fig. 3.3. Configurația rețelei de distribuție a apei potabile (prelucrare din [93])

### 3.2. Elementele de tubulatură ale conductelor din polietilenă

### 3.2.1. Țevi utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Extinderea utilizării conductelor din polietilenă în detrimentul celor metalice a fost posibilă datorită avantajelor oferite de acestea. La realizarea rețelelor de distribuție a apei potabile, în România, în ultimii 20-25 ani au fost utilizate cu preponderență conductele din polietilenă. Punerea în operă a acestora este reglementată prin SR 4163-3 [94], unde se menționează că "Rețelele de distribuție a apei trebuie executate din materiale (țevi sau tuburi, piese speciale, armături de închidere și reglare) care corespund cerințelor impuse prin proiect și reglementărilor tehnice în vigoare și anume: ..., polietilena de înaltă densitate etc." și "compatibilitatea materialelor sudate – același tip de polietilenă – PE 100 sau PE 80 etc.".

#### 3.2.2. Fitinguri utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Conform [95], în Secțiunea 3 – Montarea conductelor, la art. 209, se precizează că "Pentru realizarea schimbărilor de direcție, ramificațiilor și modificărilor diametrelor conductelor din polietilenă se pot utiliza:

a) fitinguri (mufe, coturi, teuri, reducții, etc.) realizate prin injecție;

b) *fitinguri mecanice* (mufe, coturi, teuri, reducții etc.) cu etanșare pe peretele exterior al țevii."

Fitingurile de îmbinare cum ar fi mufe, ramificații, cruci, reducții, dopuri etc., de regulă, sunt de tipul "click" pentru a ușura procesul de îmbinare [97].

### a. Coturi utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Principalele categorii de coturi utilizate la realizarea sistemelor de conducte din PEHD, sunt: *Ing. Ioana-Daniela Manu* 30

*a.1. Coturile segmentate* sunt fabricate din segmente de țeavă, așa cum se prezintă în figura 3.4. Dimensiunile caracteristice ale coturilor, sunt, conform ISO 4427-3 [96]:  $D_n$  – dimensiunea nominală ( $D_e$  – diametrul exterior), L – lungimea tubulară a piesei de capăt de fuziune, Z – lungimea nominală a ramificației fitingului la axă.

*a.2. Coturile cilindrice*, reprezentate în figura 3.5, sunt, conform ISO 4427-3 [96], supuse unor recomandări cu privire la lungimea tubulară a piesei de capăt de fuziune, L, și la unghiul nominal al fitingului,  $\alpha$ .



Fig. 3.5. Coturi cilindrice: a) la 90° și b) la 45°

*a.3. Coturi electrosudabile*, care au corpul realizat din material termoplastic sudabil și conțin un fir de încălzire - armătură - inserat pe suprafața interioară, prin care se face alimentarea cu curent electric în vederea sudării prin electrofuziune.

#### b. Ramificații utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Pentru conexiuni rapide – în special pe zona de utilizator final – se utilizează conectori rapizi, de diferite tipuri și dimensiuni.

Pentru realizarea sistemelor de conducte destinate transportului și distribuției apei potabile se utilizează, cu precădere, ramificații pentru sudare pe țeavă. Acestea sunt de tip Teu.

*Teurile* utilizate la realizarea conductelor din polietilenă, pot fi de tip egal sau redus (figura 3.8).



Fig. 3.8. Ramificații: a. teu egal PE100 SDR17; b. teu redus PE100 SDR17; c. teu egal electrosudabil PE100; d. Teu redus electrosudabil PE100

#### c. Reducții utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Reducțiile – denumite și cuplaje reducătoare – reprezintă piese de legătură între tuburi sau țevi cu diametre diferite.

#### 3.2.3. Armături utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Armăturile au rolul de închidere sau deschidere a conductelor, respectiv de oprire sau reluare a curgerii fluidului transportat prin conductă, de modificare a debitului și a parametrilor fluidului, de asigurare a instalației în cazul creșterii presiunii în conducte, de măsurare a unor parametrii ai fluidului etc. Tipul de armături se alege în funcție de treapta de presiune a instalației pe care se montează, conform [95].

Conform SR 6819 [17], pe conductele de aducțiune se prevăd, de la caz la caz, următoarele armături:

a. armături de închidere și distribuție,

b. armături de reglare,

c. armături de siguranță și închidere etc.

### 3.2.4. Elemente auxiliare utilizate la realizarea conductelor din polietilenă

Elementele auxiliare utilizate la realizarea conductelor din polietilenă au rolul de a transmite forțele care acționează asupra conductelor atât elementelor componente ale conductei cât și solului, cu scopul menținerii geometriei spațiale a conductei pe durata regimurilor de exploatare diferite. Acestea sunt de tipul: manșon, mufă, adaptor, piesă de tranziție, racord, garnitură.

Pe întregul traseu al conductelor din PEHD instalate suprateran se utilizează *suporturi* pentru rezemare. Suporturile sunt de patru tipuri: *suportul tip A*, *suportul tip B*, *suportul tip C* și *suportul tip D*.

#### 3.2.5. Componente secundare ale conductelor din polietilenă

Alături de elementele de bază - țevile, fitingurile, armăturile, elementele de asamblare – în compunerea sistemelor de conducte din polietilenă sunt utilizate:

- a) dispozitive pentru prevenirea și amortizarea loviturii de berbec;
- b) aparate pentru măsurarea debitului și presiunii;
- c) compensatoare de montaj etc.

### 3.3. Caracteristicile constructive ale conductelor din polietilenă

#### 3.3.1. Dimensiuni constructive

*Dimensiunile constructive* ale tubulaturii conductelor din polietilenă sunt stabilite din considerente funcționale sau rezultă din calculul de rezistență. Forma geometrică a secțiunii transversale a conductelor din polietilenă utilizate în rețelele de distribuție a apei potabile este circulară.

Măsurarea dimensiunilor constructive trebuie realizată după cel puțin 24 de ore de la fabricație și după o condiționare de cel puțin 4 ore la o temperatură de  $(23 \pm 2)$  °C, conform ISO 4427-2 [51].

a. diametrul exterior nominal, D<sub>e</sub>, exprimat în mm;

Diametrele exterioare ale țevilor din polietilenă PE100 utilizate pentru transportul fluidelor sub presiune sunt stabilite prin reglementări tehnice în vigoare ISO 161-1 [105], ISO 161-2 [106].

Conform ISO 11922 -1 [107] și EN 12201-2 [108] caracteristicile constructive ale țevilor din PE100 utilizate în rețelele de apă se clasifică, în mod general, în tipodimensiuni cu grade diferite, corespunzătoare unor intervale de dimensiuni referitoare la diametre exterioare și preciziile corespunzătoare, ... .

Pentru țevile realizate din materialul polietilenă PE100 utilizate la constituirea conductelor sub presiune, conform [90], sunt recomandate a fi utilizate diametre uzuale  $D_e = 20 - 1200$  mm și clase de presiune 4 - 25 bari.

b. grosimea de perete nominală, s, exprimat în mm;

Grosimile de perete ale țevilor din polietilenă PE100 utilizate pentru transportul fluidelor sub presiune sunt stabilite prin reglementări tehnice în vigoare ISO 161-1 [105], ISO 161-2 [106].

d. ovalitatea, O<sub>v</sub>, exprimată în mm;

Ovalitatea reprezintă diferența dintre mărimea maximă a diametrului exterior și valoarea minimă a acestuia în orice secțiune transversală a conductei [47].

Alături de aceste dimensiuni, în proiectare și/sau punerea în operă a sistemelor de conducte din PEHD, se utilizează și următoarele caracteristici constructive:

1. Seria tubulaturii, S, reprezintă conform [109], numărul adimensional raportat la diametrul exterior,  $D_e$ , și grosimea de perete, s, dată de relația (3.1).

$$2S + 1 \approx \frac{D_e}{s} \tag{3.1}$$

Conform ISO 161-1 [105], ISO 11922 -1 [107], DIN 8074 [109] și ISO 4065 [110], grosimea de perete, *s*, se calculează cu relația (3.2).

$$s = \frac{D_e}{2S+1} \tag{3.2}$$

2. *Raportul dimensional standard*/Standard Dimensional Ratio (SDR) este, de asemenea, un parametru în baza căruia sunt definite tubulaturile fabricate din materialul polietilenă PE100, redat în relația (3.3).

$$SDR = \frac{D_e}{s} \tag{3.3}$$

Conform [111], pentru apă, la temperatura de 23 °C, sunt utilizate țevi cu SDR17; 13,5 (13,6); 11; 9.

#### 3.3.2. Inscripționarea țevilor PEHD

Țevile din PEHD utilizate la realizarea sistemelor de conducte pentru distribuția apei potabile trebuie să fie de culoare albastră sau neagră, cu linii albastre EN 12201-2 [112]. Suprafețele interioară și exterioară ale unei țevi din PE trebuie să fie netede, curate și fără defecte, precum cavități, zgârieturi, etc. Țeava trebuie să fie delimitată perpendicular pe axa proprie.

Inscripționarea conține date importante, cu referire la: 1 – diametrul țevii, 2 – grosimea de perete, 3 – tipul utilității (apă potabilă), 4 – presiunea nominală, 5 – raportul dimensional standard, *SDR*, 6 – tipul polietilenei, 7 – locul de fabricație a tubulaturii și 8 – data fabricării.



Fig. 3.13. Inscripționarea țevilor PEHD pentru apă potabilă

#### 3.4. Caracteristicile funcționale ale conductelor din polietilenă

Pentru alegerea adecvată a elementelor de tubulatură din PEHD – corespunzător scopului aplicației – trebuie precizate următoarele caracteristici funcționale:

1. Presiunea nominală sau presiunea maximă de serviciu,  $P_n$ , (Design Pressure), este o presiune convențională (exprimată în bar) și reprezintă unul dintre criteriile de clasificare și calcul al țevilor, armăturilor și elementelor de legătură ale conductelor.

Pentru sistemele de conducte din PEHD care transportă apă, presiunea nominală,  $P_n$ , corespunde presiunii de operare maximă care poate fi susținută la 20 °C în condițiile adoptării unui coeficient total de operare, C, conform EN 12201-1 [113]. Astfel, relația de determinare a presiunii nominale este (3.4).

$$P_n = \frac{MOP}{C} \tag{3.4}$$

Valorile de presiune nominală recomandate de ISO 161-1 [105], care sunt considerate și *clase de presiune nominală minimă*, sunt redate în tabelul 3.7.

1	5	12,5
2,5	6 <sup>a</sup> (6,3 pentru R 10)	16
3,2	8	20
4	10	25

**Tabelul 3.7.** Valori ale presiunii nominale, PN, (bar), [105]

3. Presiunea de lucru admisibilă,  $P_{adm}$ , (Allowable Working Pressure), reprezintă presiunea hidrostatică maximă la care o componentă a conductei (țeavă, fiting sau armătură) este capabilă să reziste continuu în funcționare, exprimată în bar, conform EN 12201-1 [113].

Conform DIN 8074 [109], valoarea presiunii de lucru admisibile,  $P_{adm}$ , se determină cu relația (3.6).

$$P_{adm} = \frac{\sigma_h}{S \cdot C} \tag{3.6}$$

în care:

*P<sub>adm</sub>* – presiunea de lucru admisibilă, [bar];

 $\sigma_h$  – tensiunea hidrostatică, [MPa];

S – seria ţevii;

C – coeficient total de operare, C = 1,25.

4. Presiunea de încercare,  $P_{inc}$ , reprezintă presiunea la care se face încercarea hidraulică de rezistență și de etanșeitate (compactitate) a materialului țevilor, armăturilor și elementelor de legătură, exprimată în bar. Încercarea hidraulică de rezistență și de etanșeitate (compactitate) se realizează la temperatura ambiantă, cu apă.

#### 3.5. Caracteristicile tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă

Caracteristicile tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă sunt:

*1. Rezistența hidrostatică pe termen lung*,  $\sigma_{LTHS}$ . Aceasta reprezintă tensiunea, exprimată în MPa, corespunzătoare rezistenței principale prezise la o temperatura *T*, pe o durată de timp *t*, SR EN 805 [114].

4. Rezistența la tracțiune minim garantată, MRS, (Minimum Required Strength) reprezintă valoarea limitei inferioare de încredere (siguranță),  $\sigma_{LCL}$ , la 20 °C și 50 de ani, rotunjită în minus la cea mai apropiată valoare a seriei numerelor Renard R10 atunci când  $\sigma_{LCL} \ge 10$ MPa, exprimată în MPa, conform EN 12202 [112] și EN 12201-1 [113].

Valorile *MRS* sunt cuprinse între 1 ... 50 MPa și conform ISO 161-1 [105], sunt redate în tabelul 3.9.

În proiectarea unei țevi din polietilenă se urmărește determinarea presiunii interioare ce îi oferă acesteia o rezistență minimă necesară, *MRS*, în timpul exploatării, în corelație de parametrii de funcționare [**116**]. Reprezentarea grafică ce însumează rezultatele obținute în acest sens este
cunoscută ca *diagrama curbelor de regresie*. Pentru materialul polietilenă PE100 această diagramă este redată în figura 3.14.

25 5



*Tabelul 3.9.* Valorile rezistenței minime necesare, MRS, (MPa), ISO 161-1 [105]

6 2

1	0,5	55,5
1,25	8	40
1,6	10	45
2	12,5	50
2,5	16	
3,15	20	
4	22,4	
5	31,5	

Fig. 3.14. Diagrama curbelor de regresie pentru PE100 (preluare din [47])

În sensul celor mai sus prezentate, simbolizarea materialului polietilenă PE100, conform EN ISO 12162 [117], este dată de valoarea rezistenței minime necesare, *MRS*, de 10 MPa.

5. Tensiunea de proiectare,  $\sigma_s$ , reprezintă, conform EN 12202 [112] și EN 12201-1 [113], raportul dintre rezistența minimă necesară, *MRS*, și coeficientul total de operare, *C*, exprimată în MPa, rotunjită la următoarea valoare din seria numerelor Renard R20 și determinată cu relația (3.8).

$$\sigma_s = \frac{MRS}{C} \tag{3.8}$$

Pentru *MRS* = 10 MPa rezultă  $\sigma_s$  = 10/1,25 = 8 MPa.

**6.** Coeficientul total de operare, C, (înlocuiește denumirea de coeficient de siguranță, SF) și, conform EN 12202 [112] și EN 12201-1 [113], reprezintă un coeficient cu o valoare mai mare de 1, care ia în considerare atât condițiile de funcționare, precum și proprietățile componentelor unui sistem de conducte, altele decât cele reprezentate în limita inferioară de încredere. Coeficientul total de operare minim pentru conductele din polietilenă este de 1,25, conform EN ISO 12162 [117].

8. Tensiunea hidrostatică,  $\sigma_h$ , reprezintă, conform ISO 161-1 [105] și DIN 8075 [118], tensiunea datorată presiunii interioare, indusă în peretele unei țevi de fluidul sub presiune, cu care este umplută țeava, exprimată în, MPa. Tensiunea hidrostatică pe termen lung,  $\sigma_h$  se determină cu relația (3.9).

$$\sigma_h = \frac{P_i(D_e - s)}{20s} \tag{3.9}$$

în care:

 $\sigma_h$  – tensiunea hidrostatică, [MPa];

Ing. Ioana-Daniela Manu

 $P_i$  – presiunea interioară, [MPa];

 $D_e$  – diametrul exterior, [mm];

*s* – grosimea de perete, [mm].

## 3.6. Concluzii

În capitolul **3. CARACTERISTICILE CONSTRUCTIVE, FUNCȚIONALE ȘI TEHNOLOGICE ALE TUBULATURII CONDUCTELOR DIN POLEITILENĂ -** sunt prezentate aspecte referitoare la clasificarea conductelor sub presiune, la descrierea succintă a țevilor și elementelor de tubulatură din polietilenă, precum și la dimensiunile constructive ale acestora, De asemenea, sunt prezentate caracteristicile funcționale și caracteristicile tehnologice ale conductelor din polietilenă.

1. Conductele din polietilenă sunt utilizate, conform NP 133-2022 [90], după tipul de material din care sunt fabricate, pentru sistemele de alimentare cu apă.

2. Țevile din polietilenă au denumire, compoziție, culoare (atât a țevii cât și a benzii coextruse) și inscripționare specifică utilizării. Domeniile de utilizare ale țevilor din polietilenă sunt diverse, țevile utilizându-se, spre exemplificare, pentru rețele de distribuție a apei potabile, pentru rețele de distribuție a gazului, pentru canalizare etc. (vezi fig. 3.1).

3. Elementele componente ale unui sistem de distribuție, redate în figura 3.3, sunt, în general, magistrala de transport sau linie/conductă de alimentare primară, linii de serviciu, conducte de diametre care se micșorează treptat.

4. Rețelele de distribuție a apei trebuie executate din elementele componente principale: țevi, fitinguri, coturi, ramificații, reducții, armături și elemente auxiliare și elemente componente secundare care corespund cerințelor impuse prin proiect și reglementărilor tehnice în vigoare.

5. Elementele de tubulatură ale conductelor din polietilenă, care au secțiunea transversală circulară și forma cilindrică, fiind goale la interior și având lungimea mult mai mare decât diametrul, sunt caracterizate de dimensiunile constructive: diametrul exterior (nominal) și grosimea de perete nominală.

6. Conform EN 12201-2 [112], pentru realizarea sistemelor pentru distribuția apei potabile trebuie utilizate țevi din PEHD de culoare neagră, cu linii albastre coextrudate. Aceste țevi sunt inscripționate cu date tehnice necesare identificării.

8. Caracteristicile funcționale ale conductelor din polietilenă sunt reprezentate prin presiunea nominală sau presiunea de serviciu,  $P_n$ , presiunea de operare maximă, MOP, presiunea de lucru admisibilă  $P_{adm}$ , și presiunea de încercare,  $P_{inc}$ . Relația dintre presiunea nominală,  $P_n$ , și presiunea de operare maximă, MOP, se stabilește prin coeficientul total de operare, C, care, pentru polietilenă, are valoarea de 1,25.

9. Presiunile de lucru admisibile pentru țevi din PE100, pentru distribuția apei, pentru un coeficient de siguranță de 1,25 sunt reglementate de DIN 8074 [109] ... .

10. Caracteristicile tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă garantează siguranța în funcționare a sistemelor de conducte în general și a sistemelor de distribuție a apei potabile în particular.

## CAPITOLUL 4. CALCULUL ANALITIC AL CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ SUBTERANE

Conductele din PEHD sunt, în cvasitotalitate, montate îngropat. În cazul conductelor montate mai aproape de suprafață, care prezintă o valoare mare a raportului  $D_e/s$ , evaluarea comportamentului țevii PEHD, concretizat în tensiuni principale și deformații specifice, sub încărcări exterioare și interioare, presiuni active și dinamice, se realizează prin verificarea condițiilor de rezistență, de stabilitate și de deformație (rigiditate).

#### 4.1. Dimensionarea conductelor din polietilenă subterane

#### 4.1.1. Determinarea grosimii de perete

Dimensionarea conductelor din polietilenă subterane (îngropate) presupune determinarea grosimii minime de perete, *s*, în condițiile precizate ale aplicației. Determinarea grosimii minime de perete, *s*, în cazul unei țevi de diametru exterior,  $D_e$ , solicitată la presiune interioară,  $P_i$ , pentru o tensiune de calcul,  $\sigma_{c1}$ , se realizează în baza relației (4.1), conform ISO E4065 [110], [32] și [121].

$$s = \frac{D_e \cdot P_i}{(2 \cdot \sigma_{c1} + P_i)} \tag{4.1}$$

Tensiunea de calcul,  $\sigma_{c1}$ , are valoarea determinată din diagrama curbelor de regresie pentru PE100 prezentată anterior, în figura 3.14, din capitolul 3 al prezentei lucrări.

Pentru țevi cu raportul  $D_e/s$  mare se impune verificarea grosimii de perete, s, sub acțiunea sarcinilor exterioare. Un caz special pentru această verificare îl reprezintă conducta care nu este sub presiune tot timpul (sau presiunea este foarte scăzută).

### 4.1.2. Verificarea conductelor din polietilenă subterane

Verificarea conductelor din polietilenă subterane impune, din punct de vedere al *deplasării* totale maxime efective sau a *deformației* (tridimensională) efective,  $\delta_{ef}$ , îndeplinirea condiției de deformație (rigiditate), prezentată în relația (4.2), în care  $\delta_{max}$  reprezintă deformația maximă admisibilă.

$$\delta_{ef} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \le \delta_{\max} \tag{4.2}$$

în care:

u, v, w – deplasări pe direcțiile x, y, z, [mm]

Condiția de stabilitate impune menținerea formei inițiale de echilibru stabil al țevii din PEHD subterane sub acțiunea forțelor de solicitare.

#### 4.1.3. Determinarea solicitărilor maxime ale conductelor din polietilenă subterane

Determinarea solicitărilor maxime ale conductelor din polietilenă subterane presupune îndeplinirea condiției impusă forței maxime de solicitare,  $F_{max}$ , comparativ cu o valoare critică,  $F_{cr}$ , pentru un coeficient de siguranță, C, redată în relația (4.3).

$$F_{\max} \le \frac{F_{cr}}{C} \tag{4.3}$$

### 4.2. Proiectarea sistemelor de conducte din PEHD

#### 4.2.1. Evaluarea rezistenței portante a conductelor din polietilenă subterane

Proiectarea conductelor din PEHD subterane presupune realizarea unei succesiuni de etape de identificare, calcul, alegere și verificare a parametrilor constructiv-funcționali. Astfel, pornind de la precizarea caracteristicilor de bază ale conductei, solului și parametrilor de lucru, se continuă cu determinarea presiunilor totale, presiunii și suprapresiunii, datorate încărcării din sol și din trafic, ce acționează asupra conductei. Ulterior se verifică stabilitatea conductei, ceea ce presupune determinarea rigidității țevii din PEHD, proiectarea finalizându-se cu verificarea deformării (ovalizarea).

Datele inițiale necesare pentru calculul sarcinii totale ce acționează asupra unei țevi PEHD, componentă a unei conducte subterane, sunt:  $Q_t$ - sarcina totală care acționează asupra țevii și

 $L_t$  – lungimea țevii. Variabilele fundamentale utilizate în calculul unei țevi subterane sunt:  $D_e$  – diametrul exterior al țevii, *s* – grosimea de perete,  $P_i$  – presiunea interioară și  $\sigma_{adm}$  – tensiunea admisibilă a materialului țevii. Aceste patru variabile fundamentale, pot fi reduse la doi termeni, adimensionali, precum (*s*/ $D_e$ ) și ( $P_i/\sigma_a$ ).

În conformitate cu EN 1295-1 [122] proiectarea sistemelor de conducte subterane, destinate alimentării cu apă se realizează cu parcurgerea etapelor precizate în figura 4.1.

Etapa inițială din schema de proiectare a țevii din PEHD subterane presupune:

- a. precizarea diametrului, care reiese din descrierea tipului țevii;
- b. stabilirea temperaturii de lucru, care este considerată, de obicei, de 23 °C;
- c. precizarea duratei de operare, care este considerată, de obicei, de 50 ani;
- d. precizarea dimensiunilor şanţului.



Fig. 4.1. Schema pentru proiectarea conductei din PEHD subterane (prelucrare după [122])

Instalarea țevii în șanț este redată schematizat, conform standardului EN 1295-1 [122], în figura 4.2.



Fig. 4.2. Instalarea țevii în șanțului redată schematizat (prelucrare după EN 1295-1 [122])

Conform SR EN ISO 14688-2 [124], clasele de pământuri sunt: foarte grosiere, grosiere, fine, organice și pământ antropic. În tabelul 4.1 sunt redate determinările cantitative și fracțiunile principale ale claselor de pământuri.

Tabelul 4.1. Clase de pământuri în care pot fi practicate reazeme SR EN ISO 14688-2 [124]							
Clase de pământuri	foarte grosiere	grosiere	fine	organice	pământ antropic		
Determinarea	> 50 % din masa particulelor ≥ 200 mm	<ul> <li>&gt; 50 % din masa particulelor</li> <li>&lt; 63 mm şi</li> <li>≥ 2 mm</li> </ul>	plasticitate redusă sau fără plasticitate				
Determinarea cantitativă	> 50 % din masa speciale particulelor < 200  mm si $\ge 63 \text{ mm}$	> 50 % din masa particulelor < 2 mm şi ≥ 0,063 mm	plastic				
Fracțiunea	Blocuri (Bo)	Pietriș (Gr)	Praf (Si)	Turbă (Pt) Gyttja (Gy)	Teren antropic		
principală (simbol)	Bolovăniș (Co)	Nisip (Sa)	Argilă (Cl)	Dy (Dy) Humus (Hu)	Umplutură		

Tipurile de reazeme se împart, conform SR EN 1610 [125], în: tip de reazem nr. 1, ce poate fi practicat în pământuri foarte grosiere sau grosiere, tip de reazem nr. 2, ce poate fi utilizat în pământuri fine, și tip de reazem nr. 3, corespunzător pentru pământurile organice și antropice. Reprezentările acestor tipuri de reazeme sunt redate în figura 4.4*a*, figura 4.4*b*, respectiv figura 4.4*c*.



Fig. 4.4. Tipuri de reazem: a) tip reazem nr.1; b) tip reazem nr. 2; c) tip de reazem nr. 3

Grosimea minimă a patului de pozare,  $a_1$ , nu trebuie să fie mai mică de 100 mm pentru sol normal și mai mică de 150 mm pentru sol tare sau stâncă. În reprezentarea tipului de reazem nr. 1 este redată și grosimea patului de pozare,  $a_1$ .

Conform [30], durabilitatea rețelei PE depinde de modul de punere în operă a componentelor acesteia. Astfel, o condiție importantă pentru determinarea calității și implicit a duratei de folosire a rețelei este modul de realizare a umpluturii. Acesta, prin reacțiunea stratului și a modului prin care se realizează repartiția sarcinii asupra rețelei, influențează tensiunile și deformațiile ce se produc.

Cunoașterea tipului de sol în care va fi îngropată țeava reprezintă o etapă necesară în proiectarea conductelor din PEHD subterane.

În codul de proiectare ATV-DVWK-A 127E [126] solurile sunt clasificate în patru grupe în funcție de tipul solului și de densitatea acestuia, așa cum sunt redate în figura 4.5.



Fig. 4.5. Grupele de soluri (prelucrare după ATV-DVWK-A 127E [126] și [47])

Răspunsul unui sistem de umplere a solului depinde de modulul de elasticitate al materialului de umplere (care depinde de gradul de compactare) și de modulul de elasticitate a peretelui șanțului [47]. Astfel, în calcule se utilizează:

 $E_1$  – modulul de deformare pentru umplutura de deasupra generatoarei superioare a țevii (coroanei țevii), [MPa];

 $E_2$  – modulul de deformare pentru umplutura laterală a țevii, [MPa];

 $E_3$  – modulul de deformare pentru solul neperturbat din peretele șanțului, [MPa];

E<sub>4</sub> – modulul de deformare pentru materialul fundației de sub țeavă, [MPa].

Modulul de deformare a solului poate fi determinat prin măsurători directe sau pot fi utilizate valorile din tabelul 4.2.

Grupa de sol	Greutatea volumică a solului, <sup>Ysol,</sup>	Greutatea specifică submersată, γ <sub>sol-apă</sub> ,	Unghiul de frecare internă a solului,	Gradul de compactare (Procto $D_{PR}$ , [%] Moduli de rezistență $E_1, E_2, E_4$ , [MPa]			tor), , E <sub>3</sub> ,		
	[t/m <sup>*</sup> ]	[t/m]	Ψ,[]	85	90	92	95	97	100
G <sub>1</sub>	2,0	1,1	35	2,0	6	9	16	23	40
G <sub>2</sub>	2,0	1,1	30	1,2	3	4	8	11	20
G <sub>3</sub>	2,0	1,0	25	0,8	2	3	5	8	13
G <sub>4</sub>	2,0	1,0	20	0,6	1,5	2	4	6	10

Tabelul 4.2. Valorile modulilor de deformare  $E_1, E_2, E_3, E_4$ 

# 4.2.2. Determinarea sarcinii exterioare totale la care este supusă țeava îngropată din PEHD

În timpul încărcării, în țevile din PEHD subterane se pot dezvolta valori mari ale tensiunilor datorate interacțiunii sol-structură, prezenței încărcării traficului, greutății coloanei de sol, schimbărilor de temperatură zilnice și sezoniere și presiunii interne.

Determinarea sarcinii exterioare totale la care este supusă țeava îngropată din PEHD,  $Q_t$ , se bazează pe determinarea sarcinii totale la care este supus un inel de țeavă de lungime 10 mm,  $q_t$ , și se obține prin multiplicarea cu 1/10 din valoarea corespunzătoare lungimii țevii,  $L_t$ .

Determinarea sarcinii totale la care este supus un inel de țeavă de lungime 1 mm,  $q_t$ , constă în analiza structurală, sub acțiunea momentelor maxime de îndoire, a inelului de țeavă de lungime 10 mm din țeavă îngropată, sub încărcarea dată EN 1295-1 [122].

În calcul se ține cont de încărcările următoare:

- presiunea activă medie verticală a solului, P<sub>v</sub>, (greutatea prismei de teren de deasupra ţevii);
- presiunea dinamică sau suprapresiunea din trafic, P<sub>t</sub>, reprezentată de sarcina verticală datorată presiunii de la un drum de suprafață (greutatea asfaltului, greutatea vehiculelor etc.);
- 3. presiunea de reacție orizontală/laterală a solului datorată deformării conductei, P<sub>h</sub>;
- 4. presiunea datorată prezenței apei subterane,  $P_{apă}$ .

În determinarea influenței fiecăreia dintre presiunile precizate anterior asupra momentului de îndoire a inelului de țeavă de lungime de 10 mm se ține cont de factori de corecție în funcție de unghiul de așezare, tipul de așezare și rigiditatea sol-conductă.

## 4.2.2.1. Determinarea presiunii activă medie verticală a solului

Presiunea activă medie verticală a solului,  $P_{\nu}$ , reprezintă presiunea datorată greutății solului într-o secțiune orizontală situată la o adâncime egală cu înălțimea de acoperire a țevii, H, de la suprafața terenului. Această sarcină este numită presiunea din sarcină staționară (dead load pressure) și, în cazul subtraversărilor unor căi de transport, se suplimentează cu presiunea produsă de trafic (live load pressure) [127] (fig. 4.6).



Fig. 4.6. Presiunea verticală a solului la nivelul generatoarei superioare a țevii (prelucrare după [127])

Presiunea verticală a solului,  $P_{\nu}$ , se determină cu relația (4.5).

$$P_{\nu} = \chi \cdot \gamma_{sol} \cdot H \tag{4.5}$$

în care:

Ing. Ioana-Daniela Manu

 $P_v$  – presiunea verticală a solului, [daN/cm<sup>2</sup>];

 $\chi$  – coeficient de sarcină a terenului care depinde de caracteristicile acestuia și geometria șanțului;  $\gamma_{sol}$  – greutatea volumică a solului, [t/m<sup>3</sup>];

 $H - \hat{n}$ ălțimea de acoperire a țevii, [m].

#### 4.2.2.2. Determinarea presiunii dinamice sau a suprapresiunii din trafic

Presiunea dinamică sau suprapresiunea din trafic,  $P_t$ , se determină considerând încărcarea provenită din trafic ca fiind uniform distribuită,  $q_T$ , și în funcție de înălțimea de acoperire, H, de diametrul mediu al țevii,  $D_m$ , și de tipul traficului, se aplică, corespunzător, relația (4.10).

$$P_t = \Phi \cdot C_p \cdot q_T \tag{4.10}$$

în care:

 $P_t$  – presiunea dinamică sau suprapresiunea din trafic;

 $\Phi$  – coeficient de impact;

 $q_T$  – încărcarea uniform distribuită provenită din trafic;

 $C_p$  – coeficient de corecție ce ține cont de presiunea exercitată pe secțiunea transversală și longitudinală a țevii.

#### 4.2.2.3 Determinarea presiunii verticale totale

*Presiunea verticală totală*,  $P_{v,tot}$ , ce reprezintă suma dintre presiunea verticală a solului,  $P_v$ , și presiunea dinamică sau suprapresiunea din trafic,  $P_t$ , se calculează cu relația (4.13).

$$P_{v,tot} = P_v + P_t \tag{4.13}$$

## 4.2.2.4. Determinarea presiunii de reacție laterală a solului datorită deformării conductei

Presiunea de reacție orizontală/laterală a solului datorită deformării conductei,  $P_h$ , se determină prin multiplicarea valorii presiunii verticale totale,  $P_{v,tot}$ , cu coeficientul lui Rankine,  $K_1$ , și se determină cu relația (4.14), conform EN 1295-1 [122].

$$P_h = K_1 \cdot P_{v,tot} \tag{4.14}$$

#### 4.2.2.5. Determinarea presiunii datorată prezenței apei subterane

Presiunea datorată prezenței apei subterane,  $P_{apă}$ , se determină, pe baza greutății specifice a apei,  $\gamma_{apā}$ , a înălțimii apei deasupra generatoarei superioare a țevii, h, și a diametrului mediu,  $D_m$ , cu relația (4.15).

$$P_{ap\check{a}} = \gamma_{ap\check{a}} \cdot \left(h + \frac{D_m}{2}\right) \tag{4.15}$$

Elemente necesare în determinarea presiunii datorate prezenței apei subterane,  $P_{apa}$ , sunt prezentate în figura 4.8.



Fig. 4.8. Elemente necesare în determinarea presiunii datorate prezenței apei subterane

#### 4.2.3. Verificarea rigidității țevii

Rigiditatea specifică a țevii,  $S_t$ , reprezintă capacitatea țevii de a rezista la deformare sub sarcini exterioare sau la vacuum și se exprimă în MPa. Rigiditatea țevii crește cu creșterea grosimii peretelui.

Rigiditatea specifică a țevii,  $S_t$ , se determină pe baza modulului de elasticitate al materialului țevii, E, ..., a momentul de inerție al secțiunii transversale a țevii, I,  $(I = s^3/12)$ , a coeficientul de contracție al materialului țevii,  $\mu$ , și diametrului mediu al țevii,  $D_m$ , cu relația (4.16), conform [8].

$$S_{t} = \frac{EI}{1 - \mu^{2}} \cdot \frac{1}{D_{m}^{3}}$$
(4.16)

Raportul de rigiditate al sistemului sol-țeavă,  $S_{st}$ , reprezintă un indicator de caracterizare a comportamentului rigid sau flexibil al unei țevi, exprimând raportul dintre rigiditatea solului exprimată prin modulul total al reacției solului, E', și rigiditatea specifică a țevii,  $S_t$ .

Raportul de rigiditate al sistemului sol-țeavă,  $S_{st}$ , se determină cu relația (4.20).

$$S_{st} = \frac{E'}{S_t} = \frac{(1 - \mu^2)E' \cdot D_m^3}{EI}$$
(4.20)

#### 4.2.4. Verificarea stabilității

Conductele din PEHD subterane își datorează stabilitatea, în mare măsură, umpluturii înconjurătoare.

În cazul conductei de PEHD subterane, supusă unei presiuni exterioare (sau vacuum), *presiunea critică*,  $P_{cr}$ , poate fi determinată, pe baza rigidității specifice a țevii,  $S_t$ , și al modulul total al reacției solului, E', cu relația (4.21).

$$P_{cr} = 2\sqrt{S_t} \cdot E' \tag{4.21}$$

Presiunea critică,  $P_{cr}$ , poate fi adaptată pentru a fi utilizată ca *presiune critică pe termen lung*,  $P_{crl}$ , respectiv ca și *presiune critică pe termen scurt*,  $P_{crs}$ , prin utilizarea valorilor modulului de elasticitate al materialului polietilenă, E, pe termen lung, respectiv pe termen scurt. În acest caz, presiunea critică,  $P_{cr}$ , se determină cu relația (4.22), pe baza diametrului exterior al țevii,  $D_e$ , și modulului total al reacției solului, E', determinat cu relația (4.4).

$$P_{cr} = 0, 6 \left(\frac{EI}{D_e^3}\right)^{0.33} \cdot (E')^{0.67}$$
(4.22)

#### 4.2.5. Verificarea ovalizării țevilor din PEHD subterane

Ovalizarea inițială a țevii din PEHD, remarcată la majoritatea țevilor de PEHD, în special la țevile în colaci, rulate pe tamburi, poate fi măsurată și poate constitui un indicator al calității lucrării de instalare a conductei. Ovalizarea țevii din PEHD se concretizează pe ambele direcții în *deformația* 

pe verticală a țevii, 
$$\frac{\delta_v}{D_e}$$
, și în deformația pe orizontală a țevii,  $\frac{\delta_h}{D_e}$ .

Din determinări realizate în laborator pe țevi de diferite dimensiuni, cu deformații sub 10 %, Spangler a dedus relația dintre deformațiile orizontală și verticală sub forma redată în relația (4.23) [130].

$$\delta_h = 0,913 \cdot \delta_v \tag{4.23}$$

În timp, țeava îngropată din PEHD manifestă o creștere a ovalității datorată tasării și compresibilității solului din jurul acesteia. Ovalitatea țevii din PEHD subterane este prezentată în figura 4.10.



Fig. 4.10. Ovalitatea țevii din PEHD subterană

Conform GP – 043/99 [65], deformația maximă admisibilă,  $\delta_{max}$ , trebuie să îndeplinească condiția din relația (4.26).

$$\delta_{max} \le 5\% \cdot D_m \tag{4.26}$$

Pentru stabilirea deformației limită de proiectare din punct de vedere al deformației se realizează comparația dintre *deformația efectivă a țevii*,  $\delta_{ef}$ , și *deformația maximă admisibilă*,  $\delta_{max}$ . Situația admisă este  $\delta_{ef} < \delta_{max}$ , în cazul valorilor  $\delta_{ef} > \delta_{max}$  fiind necesară trecerea la o conductă cu o grosime de perete mai mare sau folosirea unei protecții adecvate.

#### 4.3. Determinarea stării de tensiuni din peretele țevii

#### 4.3.1. Determinarea stării de tensiuni din peretele țevii datorată presiunii interioare

În cazul în care grosimea de perete a țevii, *s*, îndeplinește condiția  $s < 0,2 R_i$ , ( $R_i$  reprezintă raza interioară a țevii), țeava este considerată cu pereți subțiri, iar starea de tensiuni se determină cu formulele specifice corpurilor de revoluție cu pereți subțiri, care presupun distribuția uniformă a tensiunilor pe grosimea peretelui.

#### 4.3.1.1. Determinarea stării de tensiuni longitudinale (axiale)

Pentru stabilirea relației de calculul a tensiunii longitudinale,  $\sigma_l$ , determinată de presiunea interioară,  $P_i$ , ce acționează în direcție longitudinală, se consideră două suprafețe obținute prin secționarea țevii cu un plan de secțiune perpendicular pe axa țevii.

Pe una dintre suprafețe, interioară țevii, de formă circulară, de dimensiune egală cu diametrul mediu,  $D_m = D_e - s$ , acționează forța din presiunea interioară,  $P_i$ . Pe cealaltă suprafață, de formă inelară, de dimensiune egală cu diferența dintre diametrul exterior,  $D_e$ , și diametrul interior,  $D_i$ , ia naștere, forța tensiunea longitudinală,  $\sigma_i$ , în sens opus forței din presiune interioară.

Din egalitatea expresiilor celor două forțe, necesară pentru a menține în regim staționar țeava, se obține expresia de calcul a tensiunii longitudinale,  $\sigma_l$ , în funcție de diametrul mediu al țevii,  $D_m$ , și de presiunea interioară,  $P_i$ , redată în relația (4.29).

$$\sigma_l = \frac{\left(D_e - s\right) \cdot P_i}{4 \cdot s} \tag{4.29}$$

### 4.3.1.2. Determinarea tensiunii circumferențiale (transversale)

Presiunea interioară,  $P_i$ , acționează asupra țevii și în direcție radială. Ca răspuns al acestei acțiuni, în peretele țevii se manifestă o reacțiune sub forma *tensiunii circumferențiale*,  $\sigma_c$ .

Pentru stabilirea relației de calculul a tensiunii circumferențiale,  $\sigma_c$ , determinată de presiunea interioară,  $P_i$ , se consideră două suprafețe, obținute prin secționarea țevii cu un plan de secțiune paralel cu axa longitudinală a țevii.

Din egalitatea expresiilor celor două forțe se obține expresia de calcul a tensiunii circumferențiale,  $\sigma_c$ , pe baza presiunii interioare,  $P_i$ , redată în relația (4.32).

$$\sigma_c = \frac{(D_e - s) \cdot P_i}{2s} \tag{4.32}$$

#### 4.3.2. Determinarea stării de tensiuni din peretele țevii datorată greutății proprii a țevii

Efectul de încărcare din greutatea proprie a țevii,  $G_t$ , trebuie inclus, fie ca o reducere a capacității portante a țevii sau ca o suplimentare echivalentă a sarcinii verticale EN 1295-1 [122].

Calculul greutății proprii a țevii,  $G_t$ , se realizează cu relația (4.34), ca produs dintre greutatea specifică a polietilenei,  $\gamma_{PE100}$ , și volumul țevii,  $V_t$ .

$$G_t = \gamma_t \cdot V_t \tag{4.34}$$

## 4.3.3. Determinarea stării de tensiuni din peretele țevii datorată greutății apei din interiorul țevii

Încărcarea țevii prin umplere cu apă trebuie considerată, în calcule, ca o reducere a capacității portante a țevii sau ca o suplimentare echivalentă la sarcina verticală EN 1295-1 [122].

Determinarea greutății țevii,  $G_{apă}$ , ca produs dintre greutatea specifică a apei,  $\gamma_{apă}$ , și volumul de apă din interiorul țevii,  $V_{apă}$ , se realizează cu relația (4.37).

$$G_{ap\breve{a}} = \gamma_{ap\breve{a}} \cdot V_{ap\breve{a}} \tag{4.37}$$

#### 4.3.4. Determinarea stării de tensiuni din peretele țevii datorată dilatării termice

Conform [30], *dilatarea termică a țevii subterane*,  $\Delta L_t$ , se determină prin intermediul relației (4.38), pe baza lungimii țevii,  $L_t$ , și a variației de temperatură,  $\Delta T$ .

Ing. Ioana-Daniela Manu

În relația de determinare a dilatării termice a țevii *subterane*,  $\Delta L_t$ , din relația (4.38), se utilizează *coeficientul de dilatare termică liniară* al PE,  $\alpha_d$ , ale cărui valori variază în intervalul 0,13 ... 0,24 mm/m/°C, iar valoare sa uzuală este  $\alpha = 0,2$  [mm/m/°C] [30].

$$\Delta L_t = \alpha_d \cdot L_t \cdot \Delta T \tag{4.38}$$

în care:

 $L_t$  – lungimea țevii, [mm];

 $\Delta T$  – variația de temperatură, [°C].

Fenomenul de dilatare sau de contracție, determinat de diferența de temperatură  $\Delta T$  într-o conductă îngropată, induce în secțiunea transversală,  $S_1$ , a țevii o *tensiune longitudinală de dilatare*,  $\sigma_{dil}$ , ce se calculează cu relația (4.39).

$$\sigma_{dil} = E \cdot \alpha_d \cdot \Delta T \tag{4.39}$$

### 4.4. Calculul tensiunilor ce determină atingerea stării limită în peretele țevii

Conform teoriei I sau teoria tensiunilor normale maxime  $(T_{\sigma})$ , tensiunile principale ce caracterizează un punct din peretele țevii din PEHD subterane supusă presiunii interioare, Pi, și presiunii exterioare totale,  $P_e$ , sunt:  $\sigma_1$  – tensiunea longitudinală,  $\sigma_l$ ,  $\sigma_2$  – tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ , și  $\sigma_3$  – tensiunea radială,  $\sigma_r$ . Reprezentarea tensiunilor principale precizate anterior sunt redate în figura 4.16.



Fig. 4.16. Tensiunile ce acționează în peretele țevii

Cu scopul de a evalua rezistența țevii din PEHD subterane, pentru starea spațială de tensiuni, se folosește *condiția de rezistență* din relația (4.42), conform căreia valoarea tensiunii echivalente,  $\sigma_{ech}$ , ca și tensiune maximă efectivă, să nu depășească valoarea limită admisibilă a tensiunii,  $\sigma_a$ . Pentru materialul polietilenă PE100, tensiunea admisibilă este 8 MPa.

$$\sigma_{ech} = \max\left[\left|\sigma_{l}\right|, \left|\sigma_{c}\right|, \left|\sigma_{r}\right|\right] \le \sigma_{a}$$
(4.42)

## 4.5. Verificarea ovalizării și evaluarea deformației efective a țevii din PEHD subterană după metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER

Evaluarea *deformației efective*,  $\delta_{ef}$ , a țevii din PEHD subterană în funcție de sarcina totală la care este supusă țeava,  $Q_t$ , alături de factori precum dimensiunile proprii, dimensiunile șanțului și tipul de sol în care se pozează, poate fi realizată prin metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER, conform GP – 043/99 [65], [30], [32] și [47], al cărei algoritm este prezentat în figura 4.17.



Fig. 4.17. Model de evaluare a deformației efective a țevii din PEHD subterană (prelucrare după [32])

# 4.6. Studiu de caz – Evaluarea analitică a stărilor de tensiuni și deformații specifice țevilor din PEHD dintr-un sistem de conducte destinat distribuției apei

S-a considerat o situație reală, preluată dintr-un șantier pentru montajul unui sistem de alimentare cu apă a centrului comercial pe raza localității Moreni, județul Dâmbovița. Sistemul de alimentare are în componență țevi din polietilenă PE 100 ( $\emptyset$  90 ×5,4), SDR 17 (vezi fig. 1.1 și fig. 3.13).

Determinarea deformației efective a țevii,  $\delta_{ef}$  se realizează pe țeava de tipul: țeava PEHD apă, PE 100 (Ø 90 ×5,4), SDR 17. Acest tip de țeavă este utilizată atât în rețeaua de distribuție, cât și în branșamente de apă potabilă.

Evaluarea analitică a țevii este realizată pentru a evidenția comportamentul acesteia sub sarcină în funcție de condițiile de pozare și de încărcările la care este supusă.

- Precizarea datelor de bază în proiectare
- 1. Principalele caracteristici ale solului sunt:
- a. Grupa G<sub>1</sub> sol foarte rezistent (amestecuri pietriș-nisip cu cel puțin 40% din granule mai mari de 2,0 mm și cu un maxim de 5% mai mici de 0,06 mm).
- b. Greutatea volumică a solului,  $\gamma_{sol} = 2,0$  [t/m<sup>3</sup>];
- c. Greutatea specifică submersată,  $\gamma_{sol-apă} = 1,1$  [t/m<sup>3</sup>];
- d. Unghiul de frecare internă a solului,  $\phi = 35 [^{\circ}];$
- e. Gradul de compactare (Proctor),  $D_{PR} = 85$  [%];
- f. Moduli de rezistență ai solului  $E_1, E_2, E_3, E_4 = 2,0$  [MPa].
- 2. Dimensiunile șanțului în care este pozată țeava sunt:
- a. Grosimea patului de pozare, a = 0,1 [m];

Ing. Ioana-Daniela Manu

- b. Grosimea stratului de bază,  $b = 0,1 \div 0,15$  [m];
- c. Grosimea umpluturii inițiale, c = 0,3 [m];
- d. Lățimea minimă,  $B_{min} = 0.35$  [m];
- e. Lățimea maximă, B = 0.45 [m];
- f. Înălțimea de acoperire, H = 0.9 [m].
- 3. Principalele caracteristici ale țevii supuse cercetării sunt:
- a. Tipul țevii PE100 apă
- b. Diametrul exterior,  $D_e = 90$  [mm];
- c. Grosimea de perete, s = 5,4 [mm];
- d. Raportul dimensional standard, SDR 17;
- e. Presiunea nominală, PN = 1 [MPa];
- f. Masa, m = 1,49 [kg/m].
- 4. Caracteristici necesare determinării sarcinii din trafic:
- a. Coeficientul ce ține seama de tipul terenului, n = 6, pentru nisip netasat.
- b. Sarcina maximă pe roată,  $T_{maxr} = 1$  [daN], pentru autovehicule până la 3 tone.

Verificarea ovalizării și evaluarea deformației efective a țevii din PEHD subterane după metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER se bazează pe:

## 1. Determinarea coeficientului în funcție de tipul terenului, $C_g$

Din diagrama lui Marston redată în figura 4.15, în funcție de tipul terenului: a) teren fără coeziune și a raportului H/B = 0.9/0.45 = 2, coeficientul  $C_g = 1.7$ .

## 2. Determinarea încărcări uniform distribuite, q;

Conform relației (4.46), încărcarea uniform distribuită, q, are valoarea 1,3082 [daN/cm].

## 3. Determinarea sarcinii datorate traficului stradal, $q_T$

Sarcina datorată traficului stradal,  $q_T$ , determinată conform relației (4.47) are valoarea 763,407 [daN/cm<sup>2</sup>].

## 4. Determinarea sarcinii totale la care este supus inelul de țeavă de lungime 10 mm, $q_t$

Sarcina totală la care este supus inelul de țeavă de lungime 10 mm,  $q_t$ , determinată cu relația (4.48), are valoarea 776,489 [daN/cm<sup>2</sup>].

## 5. Determinarea tensiunii tangențiale indusă în perete, $\sigma_T$

Valoarea tensiunii tangențiale induse în perete,  $\sigma_T$ , determinată cu relația (4.49), este 718971,3 [daN/cm<sup>2</sup>] = 71897,13 [N/mm<sup>2</sup>]

## 6. Determinarea deformării efective a țevii, $\delta_{ef}$

Deformarea efectivă a țevii,  $\delta_{ef}$ , determinată cu relația (4.50) are valoarea 0,56 mm.

## 7. Determinarea deformației maxime admisibilă a țevii, $\delta_{max}$

Deformația maximă admisibilă a țevii,  $\delta_{max}$ , calculată cu relația (4.51) are valoarea 4,23.

## 8. Verificarea deformației efective a țevii, $\delta_{ef}$

Prin înlocuire în relația (4.51), se constată că deformația efectivă a țevii,  $\delta_{ef}$ , îndeplinește condiția de comparație cu deformația maximă admisibilă a țevii,  $\delta_{max}$ , din relația (4.52).

## 4.7. Concluzii

În capitolul 4, intitulat CALCULUL ANALITIC AL CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ SUBTERANE au fost vizate două obiective principale:

Ing. Ioana-Daniela Manu

- prezentarea metodologiei privind evaluarea rezistenței portante a conductelor flexibile din PEHD;

- evidențierea elementelor specifice verificării ovalizării și evaluării deformației efective a țevii din PEHD subterane după metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER.

Concluziile desprinse din prezentarea calcului analitic al conductelor din polietilenă subterane pot fi rezumate astfel:

1. Rezolvarea problemelor de rezistența materialelor concretizate în dimensionarea, verificarea și determinarea solicitării maxime a unei conducte din polietilenă subterane implică respectarea condițiilor de rezistență, de stabilitate și de deformație (rigiditate) și are ca date inițiale caracteristicile mecanice a materialului polietilenă și solicitările la care este supusă conducta. Încărcările, în cazul general, sunt de tipul: încărcări verticale și orizontale din sol, supraîncărcare din trafic și presiunea interioară.

2. Evaluarea rezistenței de susținere a conductei flexibile din PEHD subterane presupune parcurgerea etapelor din schema de proiectare recomandată de EN 1295-1 [122].

3. În timpul încărcării, țevile din PEHD subterane pot experimenta tensiuni severe datorate interacțiunii sol-structură, prezenței încărcării traficului, greutății coloanei de sol, schimbărilor de temperatură zilnice și sezoniere și presiunii interne.

5. Rigiditatea specifică a țevii,  $S_t$ , se determină pe termen scurt și pe termen lung. Determinarea se realizează pe baza modulului de elasticitate al materialului țevii, E, a momentul de inerție al secțiunii transversale a țevii, I, ( $I = s^3/12$ ), a coeficientul de contracție al materialului țevii,  $\mu$ , și diametrului mediu al țevii,  $D_m$ .

6. Pentru conducta îngropată de PEHD, supusă unei presiuni exterioare (sau vacuum), presiunea critică,  $P_{cr}$ , poate fi determinată, pe baza rigidității specifice a țevii,  $S_t$ , și al modulul total al reacției solului, E'

7. Verificarea la condiția de ovalitate a țevii din PEHD subterane se face pe baza comparației dintre deformația efectivă a țevii,  $\delta_{ef}$ , și deformația maximă admisibilă,  $\delta_{max}$ . Situația admisă este  $\delta_{ef} < \delta_{max}$ , în care  $\delta_{max} \le 5\% \cdot D_m$ . În cazul valorilor  $\delta_{ef} > \delta_{max}$  se recomandă verificarea modulului total de reacție a solului, *E*', trecerea la o conductă cu o grosime de perete mai mare sau folosirea unei protecții adecvate.

8. Evaluarea rezistenței țevii din PEHD subterane, pentru starea spațială de tensiuni, se realizează prin utilizarea *condiției de rezistență* din relația (4.42), conform căreia valoarea tensiunii echivalente,  $\sigma_{ech}$ , ca și tensiune maximă efectivă, să nu depășească valoarea limită admisibilă a tensiunii,  $\sigma_a$ . Pentru materialul polietilenă PE100, tensiunea admisibilă este 8 MPa.

10. În studiul de caz din subcapitolul 4.6. s-a aplicat metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER. S-a considerat o situație reală, preluată dintr-un șantier pentru montajul unui sistem de alimentare cu apă a centrului comercial pe raza localității Moreni, județul Dâmbovița. Obiectivul studiului a constat în determinarea deformației efective,  $\delta_{ef}$ , a țevii din PEHD subterane pentru apă, PE 100 (Ø 90 ×5,4), SDR 17. S-a constatat că deformația efectivă a țevii are o valoare de 0,56 mm, valoare inferioară valorii de 4,23 mm corespunzătoare deformației maxime admisibilă a țevii,  $\delta_{max}$ , îndeplinindu-se, astfel, condiția din relația (4.54).

## CAPITOULUL 5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERISTICILE MECANICE ALE ȚEVILOR DIN POLIETILENĂ FOLOSITE LA REALIZAREA SISTEMELOR DE CONDUCTE PENTRU DISTRIBUȚIA APEI

Având în vedere că, în majoritatea aplicațiilor care presupun transportul și distribuția apei, se utilizează țevi de polietilenă PE100, cercetările, ale căror rezultate sunt prezentate în teza de doctorat, s-au efectuat, exclusiv, pe semifabricate confecționate din acest tip de material.

Cercetările experimentale, efectuate cu scopul de a determina caracteristicile mecanice ale polietilenei PE100, s-au desfășurat în cadrul unui prim program de testare care a vizat:

- a) determinarea comportării materialului polietilenă PE100 la solicitarea de întindere monoaxială/tracțiune;
- b) determinarea comportării materialului polietilenă PE100 la solicitarea la oboseală.

## 5.1. Alegerea materialelor

Încercările au beneficiat de epruvete extrase din semifabricate (țevi) similare, având același furnizor și, pe cât posibil, aparținând unui singur lot de fabricație. Aceste aspecte sunt importante în privința asigurării unei corelații realiste și eficiente între caracteristicile mecanice ale materialului.

## 5.1.1. Încercarea la tracțiune

Încercarea la tracțiune este o încercare dinamică, de scurtă durată, ce se realizează ținând cont de principiile generale prevăzute în ISO 527-1 [56], ISO 527-2 [132] și ASTM D-638 [60].

Metoda propusă de standardele respective este aplicabilă materialului polietilenă PE100 care este un material termoplastic extrudat, rigid. Scopul aplicării metodei este de a analiza comportamentul la tracțiune al materialului și de a determina caracteristicile mecanice ale acestuia: limita de curgere, rezistența la rupere, alungirea procentuală după rupere, modulul de elasticitate longitudinal și dependența tensiune mecanică-deformație specifică.

Pornind de la premisa unei posibile anizotropii a caracteristicilor mecanice ale materialului pe cele două direcții – longitudinală/axială și circumferențială – ale semifabricatului, epruvetele au fost extrase din corpul țevii, în direcție longitudinală și, respectiv, circumferențială.

Pentru obținerea epruvetelor pe direcție transversală au fost prelevate și prelucrate din țeava de PE100 inele circulare având 4 mm lățime (fig. 5.3*a*). Ulterior, din acestea s-au obținut, prin ștanțare, patru epruvete situate la 90° și alte patru situate la 45° față de primele.

În direcție longitudinală, epruvetele s-au obținut din material poziționat pe direcția axei țevii, probele fiind amplasate simetric față de fibra medie corespunzătoare grosimii semifabricatului (fig. 5.3b).

Astfel, s-au obținut șaisprezece epruvete, dintre care:

a. patru decupate pe direcție circumferențială – în dreptul liniilor albastre ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă;

b. patru decupate pe direcție longitudinală – în dreptul liniilor albastre/dungi ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă;

c. patru decupate pe direcție circumferențială – între liniile albastre ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă;

d. patru decupate pe direcție longitudinală – între liniile albastre ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă.



Fig. 5.3. Modul de prelevare a epruvetelor: a) pe direcție transversală; b) pe direcție longitudinală

Epruvetele prelevate pentru determinarea proprietăților mecanice ale materialului țevii pe direcțiile circumferențială (C) și longitudinală (L) au fost inscripționate pentru a fi identificate ulterior desfășurării testului (tabelul 5.3).

Nr. crt.	Direcția de prelevare și poziția	Cod epruvete	Lungimea de referință, <i>L</i> <sub>0</sub> , [mm]	Grosimea în zona calibrată, <i>h</i> , [mm]	Lățimea în zona calibrată, <i>b</i> 1, [mm]	Aria secțiunii din zona calibrată, A <sub>0</sub> , [mm <sup>2</sup> ]
1.		1A1	10	3,95	10,7	42,265
2.	(C) circumferențială,	2A1	10	3,98	10,7	42,984
3.	în dreptul dungilor	3A1	10	3,98	10,8	43,092
4.		4A1	10	3,99	10,8	43,092
5.		1B1	10	4,48	10,8	48,384
6.	(L) longitudinală	2B1	10	4,36	10,7	46,652
7.	în dreptul dungilor	3B1	10	4,44	10,5	46,2
8.		4B1	10	4,51	10,7	48,257
9.		1A2	10	3,98	10,7	42,586
10.	(C) circumferențială,	2A2	10	3,96	10,6	41,976
11.	între dungi	3A2	10	4,05	10,7	43,335
12.		4A2	10	3,98	10,3	40,994
13.		1B2	10	4,49	10,5	47,145
14.	(L) longitudinală,	2B2	10	4,45	10,3	45,835
15.	între dungi	3B2	10	4,40	10,5	46,2
16.		4B2	10	4,52	10,6	47,912
$(\mathbf{C})$	directie circumferential	$\check{a}$ (I) dire	ctie longitudinală			

 

 Tabelul 5.3. Caracteristicile dimensionale ale epruvetelor folosite la încercarea la tracțiune (măsurători realizate cu respectarea ISO 16012 [133])

5.1.2. Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă

Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă este o încercare dinamică, de scurtă durată, în care epruveta - având secțiune circulară corespunzătoare porțiunii calibrate de formă cilindrică - este solicitată la un moment de încovoiere constant.

Pentru desfășurarea încercării la oboseală prin încovoiere rotativă au fost prelevate - din țeava PEHD apă, PE100 ( $\emptyset$  200 × 14,7) SDR 13,6; PN 10 bar, pe direcție axială - patru epruvete, nominal identice (fig. 5.5).

Epruveta permite aplicarea sarcinii în patru puncte așezate simetric față de reazeme. Aspectul epruvetei, conform NFT 51 120-4 [71], este redat în figura 5.5*a*.

Epruveta prelucrată are aspectul prezentat în figura 5.5b.



Fig. 5.5. Epruveta solicitată la încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă:

a) aspect schematizat (conform NFT 51 120-4 [71]  $d = 6 \dots 10$  mm,  $L_0 = \min 3d$ ,  $r \ge 3d$ ); b) aspect real Dimensionile geometrice ale epruvetei testate și valorile parametrilor de încercare sunt redate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4. Dimensiunile geometrice ale epruvetei testate și valorile parametrilor de încercare							
Caracteristici tehnice	Simbol, unitate de măsură	Valori					
Diametrul inițial al epruvetei	<i>d</i> , mm	10,02					
Diametrul capetelor de prindere	D, mm	14,2					
Lungimea totală a epruvetei	<i>l</i> , mm	120					
Lungimea calibrată a epruvetei	$l_0$ , mm	51					
Lungimea capătului de prindere	$l_p$ , mm	29					
Raza la capetele secțiunii de la care începe tranziția spre	<i>r</i> , mm	10					
diametrul de testare							
Forța aplicată	$F, \mathbf{N}$	0,330					
Momentul încovoietor maxim	$M_{max}$ , N·mm	150					
Numărul de cicluri de solicitare/durabilitate limitată	N, cicluri	20570					

## 5.2. Desfășurarea încercărilor experimentale 5.2.1. Echipamentele folosite la încercările experimentale

Echipamentele utilizate pentru desfășurarea încercărilor la tracțiune și oboseală se află în dotarea laboratoarelor Departamentului de Inginerie mecanică al Universității Petrol-Gaze din Ploiești: Laboratorul de Prelucrări prin Așchiere C II 10 – LPM1 Prelucrări Mecanice 1, Laboratorul de Examinări Distructive – LED, Laboratorul de Încercări Mecanice Complexe C II 9 – LEIMC 2 și Laboratorul de Cercetare Științifică pentru Controlul Inteligent al Tubulaturii de Transport Gaze Naturale și Petrol.

## 5.2.2. Modul de lucru al încercărilor experimentale

## 5.2.2.1. Modul de lucru al încercării la tracțiune

Prin încercarea la tracțiune se urmărește stabilirea principalelor caracteristici mecanice ale materialului polietilenă PE100.

Încercarea la tracțiune s-a efectuat în atmosfera standard normală (temperatura, T = 23 °C, umiditatea relativă 50 %), la sarcini dinamice, printr-o solicitare unică, progresivă și de scurtă durată.

Încercarea la tracțiune se execută prin aplicarea asupra epruvetei a unei forțe axiale, *N*, crescătoare, la viteză constantă, *v*. Epruveta se întinde în lungul propriei axe longitudinale. De obicei, încercarea se realizează până la ruperea epruvetei sau până la momentul în care (încărcarea, lungirea) sau (tensiunea, deformația specifică) atinge valori predeterminate. Pe durata încercării sunt măsurate (înregistrate) încărcările la care este supusă epruveta și variațiile lungimii acesteia.

## 5.2.2.2. Modul de desfășurare a încercării la oboseală prin încovoiere rotativă

Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă are ca scop determinarea limitei rezistenței la oboseală și durabilității la oboseală a materialului studiat [77].

Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă se execută în conformitate cu ISO 1143 [73].

Încercarea se realizează în condițiile atmosferei standard normale – temperatura de 23 °C și umiditatea relativă de 50% – prin aplicarea unei forțe asupra epruvetei aflată în mișcare de rotație și având extremitățile plasate pe două reazeme [77].

## 5.2.3. Desfășurarea încercărilor

## 5.2.3.1. Desfășurarea încercării la tracțiune

Forma și dimensiunile epruvetei au fost prezentate în paragraful 5.1.1. Timpul de acțiune al forței a fost până la înregistrarea ruperii. Încercarea la tracțiune a epruvetelor extrase din cupoane de țeavă din polietilenă PE100, așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1, s-a realizat în condițiile aplicării unei viteze de solicitare (*viteza de deformare de lungire*) v = 3 mm/sec, respectiv o rată de deformare  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \cdot s^{-1}$ .

În decursul încercării la tracțiune, epruveta a fost supusă unei sarcini progresive, lente, fără șocuri, până la rupere.

### 5.2.3.2. Desfășurarea încercării la oboseală prin încovoiere rotativă

Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă a fost studiată din perspectiva determinării rezistenței la oboseală a materialului PE100 și a analizei comportamentului la oboseală [138], [14], [15], [33] și [34].

Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă se desfășoară prin solicitarea repetată a epruvetei cu un moment de încovoiere determinat, constant, după un ciclu alternant-simetric, cu amplitudine constantă.

Încărcarea directă se realizează perpendicular pe axa-longitudinală a epruvetei aflată în rotație, obținându-se sarcina care produce un moment încovoietor (vezi fig. 5.11).



Fig. 5.11. Diagramele tensiunii și momentului de încovoiere

Sarcina se aplică epruvetei în patru puncte așezate simetric față de reazeme, în mod constant pe toată durata încercării, continuu, fără șocuri și la frecvența stabilită.

## 5.3. Rezultatele încercărilor experimentale și interpretarea acestora

În urma derulării încercărilor experimentale descrise în subcapitolul 5.2 s-au obținut rezultate sub forma unor seturi de date a căror prelucrare a condus la stabilirea valorilor caracteristicilor de material.

## 5.3.1. Rezultatele încercării la tracțiune și interpretarea acestora

Datele primare și rezultatele obținute în urma încercării la tracțiune a celor șaisprezece epruvete sunt prezentate în Anexele 1 și 2, în figurile 5.12, 5.13 și 5.14 și în tabelul 5.6.

În figurile 5.12, 5.13 și 5.14 sunt prezentate graficele rezultate din măsurarea și înregistrarea valorilor forței aplicate și ale lungirii epruvetei prin intermediului softului asociat sistemului de testare universal.

Din datele din Anexa 1 și din graficele redate în figurile 5.12, 5.13 și 5.14 se determină valorile deformației specifice la curgere,  $\varepsilon_y$ , prezentată anterior, prin observație și identificarea celui mai înalt punct de date în palierul de curgere. Importanța stabilirii parametrului deformație specifică la curgere,  $\varepsilon_y$ , este stabilită din etapa de proiectare a conductelor din polietilenă PE100. În acest sens, este recomandat să se stabilească o limită de proiectare utilă mai aproape de începutul palierului de curgere decât în centrul acestuia. Valorile măsurate sunt prezentate în tabelul 5.6.

<b>Tabelul 5.6.</b> Date primare și rezultate obținute la încercarea la tracțiune a celor șaisprezece epruvete									
Epruveta	<i>F</i> <sub>max</sub> , [N]	$\Delta l(F_{\rm max}),$ [mm]	<i>E</i> , [MPa]	$\sigma_{max} = \sigma_y,$ [MPa]	ε <sub>max</sub> , [%]	ε <sub>y</sub> , [%]	σ <sub>r</sub> , [MPa]	ε <sub>r</sub> , [%]	
1A1	1319,6	5,998	80,096	31,222	59,981	144,77	-	-	
2A1	1287,9	6,592	76,443	30,242	65,918	266,9425	3,83	400,109	
3A1	1281.2	6,268	69,953	29,806	62,68	370,2077	3,809	614,432	
4A1	1271,2	6,643	76,884	29,5	66,43	149,29	17,199	365,837	
1B1	1403,1	6,899	66,733	28,998	68,996	550,229	16,781	918,74	
2B1	1342,4	7,797	66,346	28,774	77,972	497,8864	15,469	989,659	
3B1	1365,2	7,59	67,031	29,283	75,9	-	14,964	482,403	
4B1	1407,5	6,558	69,442	29,166	65,585	470.9837	15,767	702,879	
1A2	1269,2	6,16	76,383	29,804	61,603	337,5378	15,788	963,436	
2A2*	-	-	-	-	-	-	-	-	
3A2	1253,6	7,259	61,109	28,929	72,593	458,1259	16,716	1472,549	
4A2	1261,3	7,086	66,5	30,767	70,864	-	16,670	656,668	
1B2	1370,6	7,342	62,347	29,073	73,416	-	16,159	774,595	
2B2	1388,8	7,48	66,488	30,299	74,801	472,8651	16,323	976,603	
3B2	1358,9	7,368	58,134	29,413	73,676	-	15,707	582,444	
4B2	1382,8	6,667	65,986	28,86	66,673	517,869	15,875	789,192	

\*epruveta nu s-a rupt.



*Fig. 5.12.* Curba încercării la tracțiune pentru epruvetele prelevate din direcție circumferențială, în dreptul liniilor albastre ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă: a) 1A1; b) 2A1; c) 3A1



Fig. 5.13. Curba epruvetei 1B1 prelevată din direcția longitudinală, în dreptul liniilor albastre ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă



Fig. 5.14. Curba epruvetei 3A2 prelevată din direcția circumferențială, între liniile albastre ce constituie marcajul țevilor din PE100 pentru apă

Aspectul epruvetelor după încercarea la tracțiune este redat în figura 5.15.



Fig. 5.15. Aspectul epruvetelor după realizarea încercării la tracțiune

Pentru determinarea valorii modulului de elasticitate inițial al materialului,  $E_0$  – definit ca pantă a curbei  $\sigma - \varepsilon$  în intervalul de deformații specifice procentuale  $\varepsilon_1 = 0.05$  % și  $\varepsilon_2 = 0.25$  % – s-a trasat diagrama din figura 5.17.



*Fig. 5.17.* Curba caracteristică reală a materialului pentru determinarea modulului de elasticitate inițial al materialului, E<sub>0</sub>

Cu scopul de a realiza o examinare comparativă între comportamentele la tracțiune ale celor șase dintre epruvetele testate, în figura 5.19 sunt reprezentate curbele caracteristice reale.



Fig. 5.19. Analiza comparativă a curbelor caracteristice reale ale materialului

Comparând datele primare și rezultatele obținute se poate preciza că toate epruvetele au prezentat un comportament tensiune-deformație relativ asemănător, indiferent de poziția de prelevare din țeava din polietilenă. Această constatare ne permite să afirmăm că polietilena PE100 dovedește o evidentă izotropie a caracteristicilor mecanice.

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{5.3}$$

Prin utilizarea relației (5.3) și a valorilor corespunzătoare modulului longitudinal, *E*, respectiv, transversal, *G*, prezentate în tabelul 5.6 se verifică condiția de izotropie,  $0.333 \le G/E \le 0.5$ , pentru  $\mu = 0.45$ , ( $\mu \in (0, 0.5)$ ). Acest lucru ne determină să spunem că semifabricatul (țeavă PE100) studiat prezintă izotropia caracteristicilor mecanice.

### 5.3.2. Rezultatele încercării la oboseală prin încovoiere rotativă și interpretarea acestora

Solicitările variabile pentru ciclul alternant simetric la care a fost solicitată epruveta în cadrul încercării la oboseală prin încovoiere rotativă au fost caracterizate de coeficientul de asimetrie, R = -1, de egalitatea dintre valorile tensiunilor maximă și minimă,  $\sigma_{max} = \sigma_{min}$  și, implicit de tensiunea medie  $\sigma_m = 0$ , iar amplitudinea tensiunii,  $\sigma_a = \sigma_{max}$ .

Încercarea de oboseală s-a desfășurat pe parcursul a 20570 cicluri, valoare înregistrată pe contorul de ture de pe panoul redat în figura 5.21.

La momentul opririi mașinii de testare s-a constatat integritatea epruvetei și lipsa unor eventuale fisuri pe suprafața acesteia.



Fig. 5.21. Înregistrarea numărului de cicluri de solicitare pe panoul mașinii de încercare la oboseală prin încovoiere rotativă

Pe baza datelor ... s-a realizat diagrama prezentată în figura 5.22, ce redă Curba lui Wöhler pentru epruveta din materialul polietilenă PE100 supus încercării la oboseală la durabilitate limitată (vezi fig. 5.22).



Fig. 5.22. Curba lui Wöhler pentru materialul polietilenă PE100 supus încercării la oboseală la durabilitate limitată: a) curba rezistenței la oboseală; b) reprezentarea în coordonate semilogaritmice

- Relația de dependență dintre tensiunea aplicată și numărul de cicluri de solicitare, pentru cazul studiat, este:

$$\sigma = -0,28\log N_f + 3 \tag{5.9}$$

## 5.4. Caracterizarea materialului (PEHD) supus cercetărilor pe baza analizei statistice a rezultatelor încercării la tracțiune

Pe baza datelor înregistrate în timpul încercării la tracțiune (Anexele 1 și 2) și a considerațiilor prezentate în subcapitolul 5.3, s-a proiectat un program de analiză statistică a rezultatelor cu scopul identificării legităților care descriu, din punct de vedere al caracteristicilor mecanice, materialul supus studiului.

Pentru șase epruvete – 1A1, 2A1, 3A1, 4A1, 1B1 și 3A2 – au rezultat, pe parcursul încercării la tracțiune, un număr de 588 de perechi de valori reprezentând înregistrări ale mărimilor tensiune mecanică,  $\sigma$ , și, respectiv, deformație specifică procentuală,  $\varepsilon_p$ .

Pentru o caracterizare, din punct de vedere al comportării mecanice, cât mai riguroasă a polietilenei PE100, s-a recurs la prelucrarea statistică a înregistrărilor respective. În acest scop s-a aplicat metoda Chauvenet.

### 5.4.1. Principiul metodei

#### 1. Principiul metodei

În urma realizării încercării la tracțiune a epruvetelor prelevate din materialul țevilor din polietilenă PE100 s-au obținut, prin prelucrarea datelor de bază, o *populație* formată dintr-un număr i = 588 de rezultate experimentale (sub formă de *tensiuni mecanice*) și, respectiv, dintr-un număr j = 588 de rezultate experimentale (sub formă de *deformații specifice procentuale*).

*Eşantioanele* pe care se aplică analiza statistică propriu-zis reprezintă componentele populației și sunt constituite din rezultatele experimentale ale fiecărui tip de epruvetă testat, respectiv, **epruvetele 1A1, 2A1, 3A1, 4A1, 1B1** și **3A2**.

O primă etapă în analiza statistică o reprezintă stabilirea valorilor normale și, implicit excluderea valorilor anormale, din datele n – numărul de măsurători care alcătuiesc eșantionul, respectiv n = 98. Acest aspect poate fi realizat printr-un *test de normalitate a datelor*.

Prin *metoda Chauvenet* poate fi realizat testul de normalitate a datelor. În acest sens pot fi parcurși pașii (P1 ... P13) din algoritmul redat în schema din figura 5.23. În algoritmul respectiv sunt

prezentate relații de calcul pentru media aritmetică, X, (5.10), dispersia,  $s^2$ , (5.11), devierea sau

Ing. Ioana-Daniela Manu

abaterea standard, *s*, (5.12), schimbarea de variabilă, *z*, (5.13), abaterea normală, *s<sub>n</sub>*, (5.14), intervalul de normalitate,  $|\overline{x} - s_n|$ , (5.15), asimetria,  $\overline{\gamma_1}$ , (5.16).

Pe baza valorilor rezultatelor experimentale,  $x_1, x_2, ..., x_n$ , i = 1, ..., 98, (redate în Anexa 1), sau determinat *parametrii de grupare: media aritmetică*,  $\overline{x}$ , și *abaterea standard*, s, și *parametrul de împrăstiere: dispersia*,  $s^2$ .

#### 2. Aplicarea metodei Chauvenet pe baza rezultatelor obținute la încercarea la tracțiune

Pentru obținerea parametrilor de grupare și împrăștiere, autoarea a realizat un produs informatic în programul EXCEL, denumit *SPER* (Procesarea statică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results).

Primul set de date de intrare pentru algoritmul propus au fost considerate rezultatele prelucrate ale încercării la tracțiune, respectiv valori ale tensiunii mecanice,  $\sigma$ , calculată ca raportul dintre valorile înregistrate în încercarea la tracțiune ale forței, F, și aria secțiunii epruvetei în zona calibrată,  $A_0$ .

Cel de-al doilea set de date de intrare pentru algoritmul propus au fost considerate rezultatele prelucrate ale încercării la tracțiune, respectiv valori ale deformației specifice procentuale,  $\varepsilon_p$ , calculată ca raportul dintre creșterea lungimii dintre repere a epruvetei,  $\Delta L$ , și lungimea inițială dintre repere a epruvetei,  $L_0$ .

Rezultatele vizate se referă la parametrii statistici de grupare și de împrăștiere. Aceștia vor oferi informații referitoare la valorile limitei de curgere,  $\sigma_y$ , ale rezistenței la tracțiune,  $\sigma_r$ , și ale alungirii după rupere,  $\varepsilon_r$ .

#### 3. Prelucrarea rezultatelor statistice cu produsul informatic SPER

În urma aplicării algoritmului prezentat la 5.4.1, pentru fiecare dintre cele șase epruvete, s-au obținut ca rezultate figurile 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 și 5.30 (reprezentări grafice ale datelor de ieșire corespunzătoare tensiunilor mecanice), tabelul 5.10 și figurile 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 și 5.36 (reprezentări grafice ale datelor de ieșire corespunzătoare alungirilor procentuale).





Fig. 5.25. Reprezentări grafice ce indică forma distribuției serie de date 1A1- tensiuni

Rezultatele aplicării produsului informatic SPER (Procesarea statistică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results) în programul Excel cu care s-a analizat

comparativ, prin aplicarea metodei Chauvenet, parametrii statistici de grupare: media aritmetică, X, și abaterea standard, s, și parametrul de împrăștiere: dispersia,  $s^2$ , sunt prezentate în tabelul 5.10.

Esantion analizat	Parametrii stat	Parametrul statistic de împrăștiere	
Lşunton ununzut	Media aritmetică, $\overline{x}$ Abaterea standard, s		Dispersia, s <sup>2</sup>
1A1	16,6465	7,3043	53,353
2A1	16,6838	7,1786	51,5327
3A1	16,9893	5,7368	32,9103
4A1	17,8241	6,253	39,1003
1B1	17,5051	3,4787	12,1013
3A2	17,1086	3,8555	14,8648

Tabelul 5.10. Evaluarea SPER a tensiunilor mecanice

## 4. Verificarea normalității distribuției datelor prin testul repartiției $\chi^2$

Aplicarea *testului repartiției*  $\chi^2$  pentru verificarea normalității distribuției datelor presupune parcurgerea etapelor (E1 – E21).

E19. Determinarea valorii  $\chi_t^2$  din tabelul 5.11, pentru nivelul de încredere, 1 –  $\alpha$ , pentru  $\alpha$  – nivelul de semnificație, și un număr de grade de libertate,  $\theta$ .

Numărul gradelor de libertate, $\theta$	7						
Valorile riscului impus/nivel (prag)	10%	5%	2,5%	1%	0,5%	0,1%	
de semnificație, α	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001	
Nivelul de încredere, $1 - \alpha$	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	
Valoarea tabelată a mărimii $\chi^2_c$	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	

**Tabelul 5.11.** Valoarea tabelată a mărimii  $\chi_c^2$  (preluare din [141])

În urma aplicării testul repartiției  $\chi^2$  pentru fiecare dintre cele șase epruvete s-au obținut rezultate redate în tabelele 5.12 (date de intrare – tensiuni mecanice) ...

Elemente de analiză				• • •		
statistică	1.1.1	0.4.1	24.1	441	101	242
	IAI	2A1	3A1	4A1	IBI	3A2
Epruveta						
E1. Valoare de minim, $x_{min}$	-0,0951	0	0,0131	0,008	-0,0421	-0,5724
E2. Valoare de maxim, $x_{max}$	31,078	30,203	29,709	29,5	28,941	28,511
E3. Numărul de clase, m	8	8	8	8	8	8
E4. Amplitudinea, W	31,173	30,203	29,6959	29,492	28,9831	29,0834
E5. Mărimea unui sub-interval,	3,8966	3,7754	3,712	3,6865	3,6229	3,6354
SI						
E6. Intervalele de date,	[-0,0951; 3,8015);	[0; 3,7754);	[0,0131; 3,7251)	[0,008; 3,6945)	[-0,0421; 3,5808)	[-0,5724; 3,063)
$[x_{min}: x_{min} + SI);$	[3,8015; 7,6981);	[3,7754; 7,5508);	[3,7251; 7,4371)	[3,6945; 7,381)	[3,5808; 7,2037)	[3,063; 6,6985)
$[x_{min} + SI: x_{min} + 2 SI);;$	[7,6981; 11,5947);	[7,5508; 11,3262);	[7,4371; 11,1490)	[7,381; 11,0675)	[7,2037; 10,8266)	[6,985; 10,3339)
$[x_{max} - 2 SI: x_{max} - SI); (x_{max}].$	[11,5947; 15,4916);	[11,3262; 15,1016);	[11,1490; 14,861)	[11,0675; 14,745)	[10,8266; 14,4495)	[10,3339; 13,9693)
	[15,4916; 19,3882);	[15,1014; 18,8768);	[14,861; 18,5730)	[14,826; 18,4405)	[14,4495; 18,0723)	[13,9693; 17,6047)
	[19,3882; 23,2848);	[18,8768; 22,6522);	[18,573; 22,285)	[18,4405; 22,127)	[18,0723; 21,6952)	[17,6047; 21,2402)
	[23,2848; 27,1814);	[22,6522; 26,4276);	[22,285; 25,997)	[22,127; 25,8135)	[21,6952; 25,3181)	[21,2402; 24,8756)
	(27,1814; 31,078]	(26,4276; 30,203]	(25,997; 29,709]	[25,8135; 29,5]	[25,3181; 28,941]	[24,8756; 28,511)
E7. Frecvențe absolute, $n_i$	8	7	4	7	3	4
	7	8	4	3	1	1
	6	5	3	1	0	0
	7	5	4	2	1	1
	47	44	62	52	79	75
	10	16	11	20	8	11
	4	4	3	4	2	3
	9	9	7	9	4	3
E8. Verificarea frecvențelor	98	98	98	98	98	98
abolute, $n_i$						
E9. Frecvențe relative, $f_i$	0,0816	0,0714	0,0408	0,0714	0,0306	0,0408
,	0,0714	0,0816	0,0408	0,0306	0,0102	0,0102
	0,0612	0,051	0,0306	0,0102	0,0000	0,0000
	0,0714	0,051	0,0408	0,0204	0,0102	0,0102
	0,4796	0,449	0,6327	0,5306	0,8061	0,7653
	0,102	0,1633	0,1122	0,2041	0.0816	0,1122
	0,0408	0,0408	0,0306	0,0408	0,0204	0,0306
	0,0918	0,0918	0,0714	0,0918	0,0408	0,0306
E10. Trasarea histogramelor	Fig. 5.25	Fig. 5.26	Fig. 5.27	Fig. 5.28	Fig. 5.29	Fig. 5.30
E11 Media aritmetică $\frac{1}{x}$	16,6465	16,6838	16,9893	17,8241	17,5051	17,1085
E12. Dispersia. $s^2$	53.353	51.5327	32,9103	39,1003	12,1013	17.9676
E13. Abaterea sau	7.3043	7,1786	5,7367	6.253	3.4767	4.2388
devierea standard, s	.,	.,	- ,	- ,	- ,	7

**Tabelul 5.12.** Verificarea normalității distribuției datelor prin testul repartiției  $\chi^2$  – tensiuni mecanice

E14. Schimbarea de variabilă, z	0,5335	0,526	0,647	0,5897	0,9318	0,8576
E15. Funcția de repartiție, $F(x)$	3,7017	0,1827	0,2094	0,1827	0,2408	0,2368
E16. Probabilitatea, $p_i$	0,0003	0,0002	0,00003	0,00003	0,00001	0,00002
E17. Produsul $n \cdot p_i$	0,0294	0,0196	0,0034	0,0034	0,0017	0,0027
E18. Valoarea calculată a lui	0,2567	0,3125	0,3024	0,3662	0,2658	0,2879
$\chi^2_c$						
E19. Valoarea tabelară a lui $\chi_c^2$	1,895	1,895	1,895	1,895	1,895	1,895
(pentru $1 - \alpha = 0.95$ )						
E20. Numărul	7	7	7	7	7	7
gradelor de libertate, $\theta$						
E21. Compararea $\chi_c^2 \leq \chi_{\gamma,\alpha}^2$	0,2567 ≤ 1,895	$0,3125 \le 1,895$	$0,3024 \le 1,895$	$0,3662 \le 1,895$	$0.2658 \le 1,895$	$0,2879 \le 1,895$

## 5.4.2. Prelucrare comparativă a rezultatelor încercării la tracțiune

Analiza comparativă a rezultatelor încercării la tracțiune pentru cele șase epruvete după mediile aritmetice  $\overline{x_{1A1}}, \overline{x_{2A1}}, \overline{x_{3A1}}, \overline{x_{4A1}}, \overline{x_{1B1}}, \overline{x_{3A2}}$ .

Parametrul de grupare – media aritmetică, x, determină diferențierea dintre densitățile de repartiție, f(x), a rezultatelor experimentale: tensiuni mecanice,  $x_i$ , iar compararea obținută este redată în figura 5.37.



Fig. 5.37. Compararea densității de repartiție după media aritmetică

# 1. Analiza comparativă a rezultatelor încercării la tracțiune pentru cele șase epruvete după coeficientul de variație, CV(x)

Pentru rezultatele experimentale: tensiuni mecanice,  $x_i$ , valorile coeficientului de variație, CV(x), sunt redate în tabelul 5.14.

Epruveta	Valoarea coeficientului de variație, <i>CV</i> ( <i>x</i> )
	[%]
1A1	43,9
2A1	43
3A1	33,8
4A1	35
1B1	19,9
3A2	22,5

Tabelul 5.14. Valorile coeficientului de variație, CV(x), pentru tensiunile mecanice determinate experimental

Comparând valorile coeficientului de variație, CV(x), ..., se observă că valorile tensiunilor epruvetei 1B1 sunt mai grupate, în timp ce valorile tensiunilor epruvetei 1A1 sunt cele mai împrăștiate. Acest aspect este confirmat de comparația valorilor abaterii sau devierii standard, s, ...: 3,4767 (epruveta

1B1) < 7,3043 (epruveta 1A1). Ca urmare, seria epruvetelor prelevate din direcție longitudinală în dreptul dungilor ce constituie marcajul țevilor din polietilenă PE100 poate fi considerată omogenă.

### 2. Compararea după valorile maxime ale parametrilor mecanici

Datele primare redate în Anexa 2 au fost utilizate pentru determinarea valorilor medii ale parametrului limita de curgere,  $\sigma_y$ , ale valorilor medii ale parametrului rezistența la rupere,  $\sigma_r$ , și ale valorilor medii ale parametrului alungire după rupere,  $\varepsilon_r$ .

Respectivele valori medii au fost stabilite în conformitate cu cerințele standardului ISO 527-1 – [56] și ASTM D-638 [60].

Valorile medii ale parametrului limită de curgere,  $\sigma_y$ , sunt prezentate în tabelul 5.16. Valorile medii ale parametrului rezistența la rupere,  $\sigma_r$ , sunt prezentate în tabelul 5.17. Valorile medii ale parametrului alungirea procentuală după rupere,  $\varepsilon_r$ , sunt prezentate în tabelul 5.18.

Para	Limita de curgere, σ <sub>v</sub> , [MPa]				
Epruvete			Nivel de încredere		
Indicator	Media aritmetică	Abaterea standard	05.0/	00.9/	
statistic			95 70	99 70	
(C) 1A1 – 4A1	30,1929	0,7507	0,1486	0,1953	
(L) 1B1 – 4B1	29,0556	0,2548	0,0504	0,0663	
(C) 1A2 – 4A2	29,6670	0,8216	0,1627	0,2138	
(L) 1B2 – 4B2	29,4115	0,6341	0,1255	0,165	
(C) – media artimetică	30,0133	0,7862	0,1556	0,2046	
(L) – media artimetică	29,2335	0,4444	0,1156	0,1156	
(C) – direcție circumfe	rențială, (L) – direcți	ie longitudinală			

**Tabelul 5.16.** Valorile medii ale parametrului limită de curgere,  $\sigma_y$ 

Tabelul 5.17. Valorile medii ale	parametrului i	rezistență la	tracțiune, $\sigma$	tr
----------------------------------	----------------	---------------	---------------------	----

Parame	Rezistența la rupere σ <sub>r</sub> , [MPa]				
Epruvete			Nivel de încredere		
Indicator statistic	Media aritmetică	Abaterea standard	95 %	99 %	
(C) 1A1 – 4A1	8,2791	7,7247	1,5294	2,1542	
(L) 1B1 – 4B1 15,7457		0,7659	0,1516	4,0970	
(C) 1A2 – 4A2	16,3918	0,5230	0,1035	4,2651	
(L) 1B2 – 4B2	16,0163	0,2768	0,0548	4,1674	
(C) – media artimetică	12,3354	4,0008	0,7921	3,2097	
(L) – media artimetică	15,8810	0,5214	0,1032	4,1322	
(C) – direcție circumferențială, (L) – direcție longitudinală					

Para	ametrul	Alungirea după rupere, ε <sub>r</sub> , [%]				
Environtele	M. P	Abatanaa atan dand	Nivel de încredere			
Epruvetele	Niedia aritmetica	Adaterea standard	95 %	<b>99 %</b>		
(C) 1A1 – 4A1	365,8374	110,0045	72,4308	95,1902		
(L) 1B1 – 4B1	773,4210	198,4592	153,1267	201,2426		
(C) 1A2 – 4A2	1030,8846	336,4795	204,101	268,2342		
(L) 1B2 – 4B2	780,7079	139,4558	154,5694	203,1387		
(C) – media artimetică	698,3610	113,2376	138,2659	181,7122		
(L) – media artimetică	777,0645	41,7217	153,848	202,1907		
(C) – directie circumferentială. (L) – directie longitudinală						

**Tabelul 5.18.** Valorile medii ale parametrului alungire procentuală după rupere,  $\varepsilon_r$ 

## 5.5. Concluzii

CERCETĂRI EXPERIMENTALE In acest capitol, având titlul PRIVIND CARACTERISTICILE MECANICE ALE TEVILOR DIN POLIETILENĂ FOLOSITE LA **REALIZAREA SISTEMELOR DE CONDUCTE UTILIZATE PENTRU DISTRIBUȚIA APEI** au fost prezentate modul de desfășurare al încercărilor mecanice de tractiune și oboseală și rezultatele experimentale obținute în urma derulării acestora, pe epruvete prelevate din țevi de polietilenă, PE100. Scopul acestui program experimental a fost acela de a determina valorile parametrilor mecanici si de a compara rezultatele astfel obținute cu valori indicate în literatura de specialitate. Acest lucru a fost determinat și de faptul că polietilena are un comportament specific determinat de mai multi factori, cum ar fi: lotul de fabricație, tipul semifabricatului determinat de scopul aplicației, condițiile de prelevare a epruvetelor etc.

Epruvetele testate în cadrul încercării la tracțiune au fost în număr de șaisprezece: 1A1- 4A1 (din direcție circumferențială în dreptul dungilor), 1B1-4B1 (din direcție longitudinală în dreptul dungilor), 1A2-4A2 (din direcție circumferențială între dungi) și 1B2-4B2 (din direcție longitudinală între dungi).

În urma desfășurării programului experimental – încercarea la tracțiune și încercarea la oboseală – s-au obținut rezultate care au condus la formularea următoarelor concluzii:

1. Încercarea la tracțiune s-a desfășurat în condițiile aplicării unei viteze de solicitare (*viteza de deformare de lungire*)  $v_{\Delta L} = 3 \text{ mm/sec}$ , respectiv o rată de deformare  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ . Au fost înregistrate câte 98 de perechi de date forță-alungire (extensie) pentru fiecare epruvetă.

4. Au fost reprezentate curbele caracteristice reale ale epruvetelor din polietilenă PE100 testate și din analiza comparativă, realizată cu ajutorul diagramei din figura 5.19, s-a constatat că valorile maxime ale tensiunilor înregistrate sunt apropiate.

5. Valorile obținute experimental sunt comparabile cu valorile prezentate în literatura de specialitate, ceea ce ne determină să afirmăm că încercările s-au desfășurat cu respectarea condițiilor impuse de normative și, de asemenea, etapele de colectare și prelucrare a datelor s-au realizat corect.

7. Prin realizarea unui studiu comparativ al datelor primare și al rezultatelor obținute s-a constat că toate epruvetele au prezentat un comportament tensiune-deformație relativ asemănător, indiferent de poziția de prelevare din țeava din polietilenă, ceea ce dovedește că polietilena PE100 prezintă o evidentă izotropie a caracteristicilor mecanice.

8. Pentru țevile obținute prin extrudare din materialul polietilenă PE100, calculele de rezistență (analitice și/sau numerice) se pot efectua ca în cazul materialelor izotrope. Acest aspect este deosebit de important mai ales în cazul aplicațiilor numerice cu elemente finite.

11. Autoarea a realizat produsul informatic *SPER* (Procesarea statistică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results) în programul Excel cu care a analizat comparativ, prin aplicatea metodei Chauvenet, parametrii statistici de grupare: media aritmetică,

X, și abaterea standard, s, și parametrul de împrăștiere: dispersia,  $s^2$ .

- 12. S-a constatat că pentru tensiunile mecanice ale celor șase eșantioane analizate:
- valorile mediei aritmetice sunt apropiate între ele;
- valoarea abaterii standard ale epruvetei 1B1 prelevată din direcție longitudinală din dreptul liniilor ce constituie marcajul țevii din polietilena PE100 este mai grupată comparativ cu ale celorlalte epruvete;

13. Prin aplicarea testului repartiției  $\chi^2$  pentru verificarea normalității distribuției datelor și parcurgerea etapelor (E1 – E21) ale acestuia s-au obținut tabelul 5.12. - verificarea normalității distribuției datelor prin testul repartiției  $\chi^2$  – tensiuni mecanice și tabelul 5.13. - verificarea normalității distribuției datelor prin testul repartiției  $\chi^2$  – deformații specifice procentuale. Atât pentru tensiunile mecanice cât și pentru deformații specifice procentuale, pentru toate cele șase eșantioane evaluate, a fost îndeplinită condiția de verificare:  $\chi^2_c \leq \chi^2_{\gamma,\alpha}$ .

14. Prin analiza comparativă a rezultatelor încercării la tracțiune pentru cele șase epruvete după coeficientul de variație, CV(x), s-a conctat că seria epruvetelor prelevate din direcție longitudinală în dreptul dungilor ce constituie marcajul țevilor din polietilenă PE100 poate fi considerată omogenă și rezultatele pot fi utilizate în cercetările viitoare.

16. Pentru cercetările viitoare pot fi utilizate, pentru parametrii mecanici evaluați experimental în prezenta lucrare, valorile medii: limita de curgere,  $\sigma_y = 29$ , 6234 MPa, rezistența la tracțiune,  $\sigma_{tr} = 14,6082$  MPa și alungirea procentuală după rupere,  $\varepsilon_r = 737,7127$  %.

## 5.5.2. Concluzii desprinse din încercarea la oboseală prin încovoiere rotatică

1. Prin *încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă* s-a determinat rezistența la oboseală a materialului polietilenă PE100, exprimată prin relația (5.9). În scopul evaluării comportamentului la oboseală s-a trasat Curba lui Wöhler atât sub forma diagramei construite cu perechi de valori  $\sigma_{max i}$ ,  $N_i$ , cât și în coordonate semilogaritmice.

3. În cadrul încercării la oboseală prin încovoiere rotativă, sarcina a fost aplicată în patru puncte așezate simetric față de reazeme.

4. În decursul experimentului s-a constatat că epruveta solicitată nu s-a rupt. Acest aspect poate fi explicat prin faptul că pentru valori ale tensiunii maxime ale ciclului,  $\sigma_{max}$ , superioare rezistenței la oboseală,  $\sigma_R$ , vâscozitatea ciclică crește cu numărul de cicluri aplicate epruvetei. La o anumită valoare a lui  $\sigma_{max}$ , egală cu rezistența la oboseală, are loc o creștere a vâscozității ciclice cu timpul, urmată de o descreștere a ei, iar epruveta nu se mai rupe.

5. Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă s-a desfășurat de la solicitării mari spre solicitării mici. Pe baza perechilor de valori tensiune la oboseală-număr de cicluri de solicitare a fost trasată curba lui Whöler în coordonate  $\sigma$ -N (fig. 5.22a) și în coordonate logaritmice (fig. 5.22b).

6. Din reprezentarea grafică din fig. 5.22*a* a fost stabilită relația de dependență dintre tensiunea aplicată și numărul de cicluri de solicitare.

7. Deoarece la înregistrarea a 20570 de cicluri de solicitare de către contorul de ture al mașinii de testare epruveta nu s-a rupt și testarea a fost întreruptă, se recomandă efectuarea unui nou test de încovoiere rotativă, ca o direcție de cercetare viitoare.

## CAPITOLUL 6. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND EVALUAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE ȚEVILOR DIN POLIETILENĂ FOLOSITE LA REALIZAREA SISTEMELOR DE CONDUCTE PENTRU DISTRIBUȚIA APEI, ÎN PREZENȚA DEFECTELOR

Defectele sau solicitările locale, inevitabile la conductele din polietilenă (datorate tehnologiilor de fabricare și sudării, pozării conductelor fără pat, amprentelor produse de o terță parte etc.), conduc la concentrarea locală a tensiunilor, reprezentând zona susceptibilă la inițierea și propagarea fisurilor în cadrul proceselor de rupere [4].

# 6.1. Considerații teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor din polietilenă ce prezintă defecte supuse încercării la tracțiune

Evaluarea efectului prezenței defectelor asupra comportării în exploatare a țevilor din polietilenă s-a realizat pe baza rezultatelor obținute la încercările experimentale realizate pe epruvete având practicate defecte superficiale.

# 6.1.1. Considerații teoretice privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor din polietilenă ce prezintă defecte supuse încercării la tracțiune

Conductele din polietilenă pot prezenta defecte de material, imperfecțiuni geometrice și/sau defecte determinate de tehnologiile de asamblare și montaj [4].

Crestăturile sunt utilizate în mod uzual cu scopul de a accelera testele și a determina apariția mult mai rapidă a cedării. În prezent, nu este clar care sunt consecințele prezenței unui defect real în ceea ce privește afectarea duratei de viață a conductelor din polietilenă utilizate pentru aplicații presurizate, de exemplu, pentru distribuția apei. Un defect într-o țeavă presurizată va determina în mod automat apariția concentrării de tensiune, datorită faptului că tensiunea din circumferință va trebui să fie suportată de o grosime a peretelui diminuată.

# 6.1.2. Considerații experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor din polietilenă ce prezintă defecte supuse încercării la tracțiune

Programul experimental a vizat utilizarea încercării la tracțiune pe epruvete prelevate din corpul țevilor din polietilenă PE100, folosite la realizarea sistemelor de conducte pentru distribuția apei, pe care s-au practicat discontinuități geometrice, cu scopul de a evalua influențele defectelor de tip lipsă de material asupra rezistenței mecanice a țevilor de polietilenă.

# 6.1.2.1. Materiale utilizate la efectuarea încercării la tracțiune pe epruvete ce prezintă defecte

Pentru experiment, pe suprafața exterioară a epruvetelor prelevate din țeavă din polietilenă **PE100 apă (\emptyset 110 × 10), SDR 11**, au fost practicate discontinuități geometrice sub forma unor crestături.

Epruvetele utilizate în încercarea la tracțiune au fost, prin raportare la direcția de solicitare, de tipul:

-cu crestătură în direcție transversală – epruvete cu defect transversal (T) (vezi fig. 6.6a),

-cu crestătură în direcție longitudinală – epruvete cu defect longitudinal (L), (vezi fig. 6.6b),

-fără crestătură - *epruvetă fără defect (FD*), (vezi fig. 6.6*c*).

Forma crestăturii obținute și dimensiunile geometrice ale acesteia, respectiv lungimea, 2c, adâncimea, a, și grosimea,  $g_d$ , sunt redate în figura 6.5.



Fig. 6.5. Forma și dimensiunile crestăturii longitudinale



*Fig. 6.6.* Epruvetele utilizate în încercarea la tracțiune: a) epruvetă cu crestătură transversală (T); b) epruvetă cu crestătură longitudinală (L); c) epruvetă fără defect (FD)

Valorile dimensiunilor geometrice ale epruvetelor și crestăturilor practicate pe acestea sunt redate în tabelul 6.2.

Tip crestătură/ defect*	Cod epruvete	Lungimea de referință, <i>L</i> <sub>0</sub> [mm]	Lățimea de referință, <i>b</i> 1 [mm]	Grosimea în zona calibrată, <i>h</i> [mm]	Aria secțiunii din zona calibrată, A <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Adâncime defect, <i>a</i> [mm]	Lungime defect, 2c [mm]	Grosime defect, g <sub>d</sub> [mm]	Aria defect, A <sub>d</sub> [mm <sup>2</sup> ]
Т	Ep1	50	10,13	9,23	93,4999	0,5	3,3	0,3	1,2959
Т	Ep2	50	10,21	8,57	87,4997	0,5	3,3	0,3	1,2959
L	Ep3	50	9,94	9,01	89,5594	1	4,6	0,3	3,6128
L	Ep4	50	10,05	8,98	90,249	0,5	3,3	0,3	1,2959
-	Ep5	50	10,11	8,96	90,5856	-	-	-	-

Tabelul 6.2. Valorile dimensiunilor geometrice ale epruvetelor și crestăturilor/defecte practicate pe

\* T – transversal; L – longitudinal.

## 6.1.2.2. Echipamente folosite la încercarea la tracțiune a epruvetelor

Pentru prelevarea epruvetelor a fost utilizată mașina universală LFM pentru teste statice și dinamice de la 150 la 400 kN (vezi fig. 6.8).



Fig. 6.8. Mașina universală LFM pentru teste statice și dinamice de la 150 la 400 kN

Crestăturile practicate pe suprafața exterioară a epruvetelor au fost realizate cu o freză disc unghiulară la 45°, prezentată în fig. 6.10.



Fig. 6.10. Freza utilizată la realizarea crestăturilor

Testarea experimentală s-a efectuat pe Sistemul universal de testare LRX Plus (Mașina de testarea a polimerilor - Lloyd - 2,5 kN), amplasat în Laboratorul de Examinări Distructive – LED al UPG Ploiești ...

## 6.1.2.3. Modul de lucru pentru realizarea încercării la tracțiune

Încercarea la tracțiune a epruvetelor prelevate din țevi din polietilenă, în care s-au practicat defecte, s-a realizat conform standardului ISO 527-2 [132], EN ISO 6259-1 [142] și EN ISO 6259-3 [143].

Încercarea la tracțiune a fost realizată la viteza de solicitare standard v = 50 mm/min, corespunzătoare ratei de deformare,  $\dot{\varepsilon} = 10^{-2}$  s<sup>-1</sup>. Cei doi parametri au fost aleși cu scopul de a evalua răspunsul la solicitarea de tracțiune a materialului polietilenă PE100 și contribuția crestăturilor asupra comportamentului mecanic prin influența ratei deformării.

## 6.1.2.4. Rezultatele obținute pentru epruvetele cu și fără defecte, și interpretarea acestora

Pentru epruvetele, cu și fără defecte, supuse încercării la tracțiune, s-au obținut rezultatele redate sub formă grafică în figurile 6.11*a*), 6.11*b*), 6.12, 6.13*a*), 6.13*b*), 6.14, 6.15, 6.16 și tabelele 6.4, 6.5 și 6.6.

De asemenea, rezultate și prelucrări ale acestora sunt prezentate în Anexa 3-1, Anexa 3-2 și în Anexa 3-3.

## 6.1.2.4.1. Rezultate obținute la încercarea la tracțiune a epruvetelor cu și fără defecte

1. Rezultate obținute la încercarea la tracțiune a epruvetelor cu defect transversal (T)

Pentru epruvetele cu defecte sub forma unei crestături practicate pe suprafață, în direcție transversală, ..., s-au obținut rezultatele redate sub formă grafică în figura 6.11*a*, figura 6.11*b*....



Fig. 6.11. a) Diagrama forță – alungire pentru epruveta Ep1 (T)



Fig. 6.11. b) Diagrama forță – alungire pentru epruveta Ep2 (T)

2. Rezultate obținute la încercarea la tracțiune a epruvetelor cu defecte longitudinale
Pentru epruvetele cu defecte longitudinale ... cu dimensiunile redate în tabelul 6.2 s-au obținut rezultate redate ... în tabelul 6.5.

<b>Tabetat 0.5.</b> Rezultate integristitate la incercurea la tracțiune a epraveleior ca defect iongliadinal					
Caracteristici tehnice – epruvete cu defect longitudinal (L)	<b>Ep3</b> (L)	<b>Ep4</b> (L)			
Forța maximă, <i>F<sub>max</sub></i> , [N]	2057,7	2049,5			
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]	21,996	22,519			
Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]	23,767	23,494			
Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_{y}$ , [%]	43,992	45,037			
Timpul până la rupere, $t_r$ , [s]	598,4	610,7			
Forța la rupere, <i>F<sub>rupere</sub></i> , [N]	1637,2	1719,5			
Alungirea la rupere, $\Delta L_{rupere}$ , [mm]	596,02	608,29			
Rezistența la rupere, $\sigma_r$ , [MPa]	18,91	19,711			
Alungirea procentuală după rupere, $\varepsilon_r$ , [%]	1192,0	1216,6			

Tabelul 6.5. Rezultate înregistrate la încercarea la tracțiune a epruvetelor cu defect longitudinal

3. Rezultate obținute la încercarea la tracțiune a epruvetei fără defect

Pentru epruveta fără defect Ep5, prelevată dintr-unul din eșantioanele prezentate în figura 6.4 și cu dimensiunile geometrice redate în tabelul 6.2, s-au obținut rezultatele redate sub formă grafică în figura 6.15 și în tabelul 6.6.



Fig. 6.15. Diagrama forță – alungire pentru epruveta Ep5

|--|

Caracteristici tehnice – epruvetă fără defect (FD)	<b>Ep5 (FD)</b>
Forța maximă/Încărcare la maxim, $F_{max}$ , [N]	2096,9
Alungirea corespunzătoare forței maxime, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]	20,38
Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]	23,148
Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]	40,759
Timpul până la rupere, <i>t</i> <sub>r</sub> , [s]	557,7
Forța la rupere/Încărcare la rupere, $F_{rupere}$ , [N]	1502,7
Alungirea corespunzătoare forței la rupere, $\Delta L(F_r)$ , [mm]	555,32
Rezistența la rupere, $\sigma_r$ , [MPa]	16,589
Alungire procentuală după rupere, ε <sub>r</sub> , [%]	1110,6

Aspectul epruvetelor solicitate la încercarea de tracțiune s-a modificat în decursul încercării experimentale astfel încât, la final, epruvetele au prezentat modificări de aspect diferite, acestea fiind redate în figura 6.16.



Fig. 6.16. Aspectul epruvetelor la finalul încercării la tracțiune

# 6.1.2.4.2. Interpretarea rezultatelor obținute la încercarea la tracțiune a epruvetelor cu și fără defecte

În figura 6.17 este redată diagrama forță - alungire  $F - \Delta L$  pentru epruvetele Ep1 – Ep5.



*Fig. 6.17.* Diagrama forță - alungire  $F - \Delta L$  pentru epruvetele Ep1 - Ep5

În figura 6.18 sunt redate curbele tensiune – deformație  $\sigma$  -  $\epsilon$  pentru cele cinci epruvete supuse încercării la tracțiune.



Fig. 6.18. Curbele tensiune – deformație  $\sigma$  -  $\varepsilon$  pentru epruvetele Ep1 – Ep5

Analiza statistică comparativă a valorilor caracteristicilor mecanice ale epruvetelor cu defect cu ale epruvetei fără defect a condus la obținerea datelor redate în tabelul 6.7 și tabelul 6.8 ... .

Caracteristici tehnice epruvete	Ep1	Ep5	Creștere/Scădere		ere
cu și fără defect	(Ť)	(FD)	Valoric	Proce	ntual
Forța maximă, $F_{max}$ , [N]	1837,6	2096,9	-259,3	-12,3659	< 12,37 %
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]	23,095	20,38	2,715	13,3219	> 13,32 %
Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]	20,202	23,148	-2,946	-12,7268	< 12,73 %
Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]	41,46	40,759	0,701	1,7199	> 1,72 %
Timpul până la rupere, <i>t<sub>r</sub></i> , [s]	1386	557,7	828,3	148,521	> 148,53%
Forța la rupere, <i>F</i> <sub>rupere</sub> , [N]	1151,4	1502,7	-351,3	-23,3779	< 23,38 %
Alungirea la rupere, $\Delta L_{rupere}$ , [mm]	230,54	555,32	-324,78	-58,4852	< 58,49 %
Rezistența la tracțiune, $\sigma_{tr}$ , [MPa]	12,314	16,589	-3,931	-23,6964	< 25,77 %
Alungirea procentuală după rupere, ɛr, [%]	461,09	1110,6	-649,51	-58,4828	< 58,48 %
Caracteristici tehnice epruvete	Ep2	Ep5	Creștere/Scădere		
cu și fără defect	(T)	(FD)	Valoric	Proce	ntual
Forța maximă, $F_{max}$ , [N]	1945,8	2096,9	-151,1	-7,2059	< 7,21 %
Alungirea, $\Delta l(F_{max})$ , [mm]	21,787	20,38	1,407	6,9038	> 6,90 %
Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]	23,044	23,148	-0,104	-0,4493	< 0,45 %
Alungirea procentuală la curgere, ε <sub>y</sub> , [%]	43,593	40,759	2,834	6,9531	> 6,95 %
Timpul până la rupere, <i>t<sub>r</sub></i> , [s]	350	557,7	-207,7	-37,242	< 37,24%
Forța la rupere, <i>F</i> <sub>rupere</sub> , [N]	1161,4	1502,7	-341,3	-22,7125	< 22,71 %
Alungirea la rupere, $\Delta L_{rupere}$ , [mm]	289,64	555,32	-265,68	-47,8427	< 47,84 %
Rezistența la tracțiune, $\sigma_{tr}$ , [MPa]	13,273	16,589	-2,834	-17,0836	< 19,99 %
Alungirea procentuală după rupere, $\varepsilon_r$ , [%]	579,2	1110,6	-531,4	-47,8480	< 47,85 %

**Tabelul 6.7.** Rezultatele obținute prin comparația valorilor caracteristicilor tehnice ale epruvetelor cudefect transversal și ale epruvetei fără defect

Caracteristici tehnice epruvete	Ep3	Ep5	Creștere/Scădere			
cu și fără defect	(Ĺ)	(FD)	Valoric	Proce	entual	
Forța maximă, $F_{max}$ , [N]	2057,7	2096,9	-39,2	-1,8694	< 1,87 %	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]	21,996	20,38	1,616	7,9293	> 7,93 %	
Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]	23,767	23,148	0,619	2,6741	> 2,67 %	
Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]	43,992	40,759	3,233	7,9320	> 7,93 %	
Timpul până la rupere, <i>t<sub>r</sub></i> , [s]	598,4	557,7	40,7	7,2978	> 7, 3%	
Forța la rupere, <i>F</i> <sub>rupere</sub> , [N]	1637,2	1502,7	134,5	8,9506	> 8,95 %	
Alungirea la rupere, $\Delta L_{rupere}$ , [mm]	596,02	555,32	40,7	7,3291	> 7,33 %	
Rezistența la tracțiune, σ <sub>r</sub> , [MPa]	18,28	16,589	2,321	13,9912	> 10,19 %	
Alungirea procentuală după rupere, $\varepsilon_r$ , [%]	1192,0	1110,6	81,44	7,333	> 7,33 %	
Caracteristici tehnice epruvete	Ep4	Ep5	Creștere/Scădere			
cu și fără defect	(L)	(FD)	Valoric	Proce	entual	
Forța maximă, <i>F<sub>max</sub></i> , [N]	2049,5	2096.9	-47.4	-2.3128	< 2 31 %	
	-		.,,.	)	• 2,5 1 70	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]	22,519	20,38	2,139	9,4986	> 9,5 %	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]	22,519 23,494	20,38 23,148	2,139 0,346	9,4986 1,4727	> 9,5 %	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]	22,519 23,494 45,037	20,38 23,148 40,759	2,139 0,346 4,278	9,4986 1,4727 9,4989	>9,5 % >1,47 % >9,5 %	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]Timpul până la rupere, $t_r$ , [s]	22,519 23,494 45,037 610,7	20,38 23,148 40,759 557,7	2,139 0,346 4,278 53	9,4986 1,4727 9,4989 8,6786	> 9,5 % > 1,47 % > 9,5 % > 8,68 %	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]Timpul până la rupere, $t_r$ , [s]Forța la rupere, $F_{rupere}$ , [N]	22,519 23,494 45,037 610,7 1719,5	20,38 23,148 40,759 557,7 1502,7	2,139 0,346 4,278 53 216,8	9,4986 1,4727 9,4989 8,6786 12,6083	> 9,5 % > 1,47 % > 9,5 % > 8,68 % > 12,61 %	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm] Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa] Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%] Timpul până la rupere, $t_r$ , [s] Forța la rupere, $F_{rupere}$ , [N] Alungirea la rupere, $\Delta L_{rupere}$ , [mm]	22,519 23,494 45,037 610,7 1719,5 608,29	20,38 23,148 40,759 557,7 1502,7 555,32	2,139 0,346 4,278 53 216,8 52,97	9,4986 1,4727 9,4989 8,6786 12,6083 8,7080	>9,5% $>1,47%$ $>9,5%$ $>8,68%$ $>12,61%$ $>8,71%$	
Alungirea, $\Delta L(F_{max})$ , [mm]Limita de curgere, $\sigma_y$ , [MPa]Alungirea procentuală la curgere, $\varepsilon_y$ , [%]Timpul până la rupere, $t_r$ , [s]Forța la rupere, $F_{rupere}$ , [N]Alungirea la rupere, $\Delta L_{rupere}$ , [mm]Rezistența la tracțiune, $\sigma_{tr}$ , [MPa]	22,519 23,494 45,037 610,7 1719,5 608,29 19,053	20,38 23,148 40,759 557,7 1502,7 555,32 16,589	2,139 0,346 4,278 53 216,8 52,97 3,122	9,4986 1,4727 9,4989 8,6786 12,6083 8,7080 15,8389	> 9,5 % > 1,47 % > 9,5 % > 8,68 % > 12,61 % > 8,71 % > 14,85%	

**Tabelul 6.8.** Rezultatele obținute prin comparația valorilor caracteristicilor tehnice ale epruvetelor cudefect longitudinal și ale epruvetei fără defect

Rezultatele analizei statistice, realizată în programul Excel, prin utilizarea Data Analysis (Descriptive Statistics) sunt redate în tabelul 6.9.

Ca *date de intrare* au fost introduse valorile obținute experimental pentru fiecare dintre cele cinci epruvete supuse încercării la tracțiune, respectiv cele cinci seturi de n = 98 valori corespunzătoare variabilelor: timp, încărcare/forță de solicitare, alungire, tensiune și deformație procentuală. Acestea au fost grupate pe coloane.

Datele de ieșire ale analizei statistice Data Analysis (Descriptive Statistics), conform [144], sunt reprezentate de media aritmetică sau media/Mean, eroarea standard/Standard Error, mediana/Median, valoarea modală/Mode, abaterea standard/Standard Deviation, Varianța (Dispersia)/Sample Variance, coeficient asimetrie/Kurtosis, coeficient aplatizare/Skewness, amplitudinea/Range, minimum/Minim, maximum/Maxim, suma/Sum, efectiv eșantion/Count și nivelul de semnificație/Confidence Level.

Tabelul 6.9.	Rezultatele	analizei	statistice	Data	Analysis	(Descriptive	Statistics)	pentru	epruvetele	supuse
			í	ncerc	ării la tra	actiune				

Statistici rezumative	Timp	Forța	Alungirea	Tensiunea	Deformația procentuală
		Ep1			
Valoare medie	700,0777	1301,2813	116,2167	13,9175	232,4327
Eroarea standard	40,6225	21,2865	6,7703	0,2277	13,5406
Valoare mediană	700,1	1309,6	116,215	14,0065	232,43
Valoare modală	#N/A	1258,7	#N/A	13,462	#N/A
Abaterea standard	402,1427	210,7256	67,0227	2,2538	134,0451
Varianța (Dispersia)	161718,7272	44405,2640	4492,0488	5,0795	17968,1002
Coeficient asimetrie	-1,1999	15,0145	-1,2001	15,0142	-1,2001
Coeficient aplatizare	1,3665E-05	-2,2992	-8,1721E-06	-2,2991	-8,1E-06

Tabelul 6.9. (continuare)					
Amplitudinea	1371,86	1740,909	228,6132	18,6199	457,2365
Valoarea minimă	14,14	96,691	1,9268	1,0341	3,8535
Valoarea maximă	1386	1837,6	230,54	19,654	461,09
Suma	68607,61	127525,571	11389,2375	1363,9146	22778,403
Efectiv eşantion	98	98	98	98	98
Nivelul de încredere (95 %)	80,6245	42,2478	13,4372	0,4519	26,8744
		Ep2			
Valoare medie	176,777	1255,7258	145,3057	14,3512	290,6099
Eroarea standard	10,2576	23,2512	8,546	0,2657	17,0918
Valoare mediană	176,8	1254,6	145,33	14,3385	290,655
Valoare modală	#N/A	1198.7	#N/A	13,738	#N/A
Abaterea standard	101,5447	230,175	84,601	2,6306	169,2004
Varianța (Dispersia)	10311,3224	52980,5313	7157,3274	6,92	28628,7778
Coeficient asimetrie	-1,2	14,7177	-1,1998	14,7176	-1,1998
Coeficient aplatizare	1,7317E-05	-1,9738	-0,0003	-1,9738	-0,0003
Amplitudinea	346,429	1932,32	288,6254	22,0839	577,1709
Valoarea minimă	3,571	13,48	1,0146	0,1541	2,0291
Valoarea maximă	350	1945,8	289,64	22,238	579,2
Suma	17324,144	123061,13	14239,9631	1406,4164	28479,7685
Efectiv eșantion	98	98	98	98	98
Nivelul de încredere (95 %)	20,3584	46,1472	16,9614	0,5274	33,9225
		Ep3			
Valoare medie	302,2756	1393,2599	299,8635	15,4811	599,7269
Eroarea standard	17,5396	18,1902	17,5396	0,1904	35,0791
Valoare mediană	302,25	1413,6	299,865	15,7800	599,73
Valoare modală	#N/A	2057,7	#N/A	15,6354	#N/A
Abaterea standard	173,6335	180,9904	173,6328	1,8849	347,2656
Varianța (Dispersia)	30148,5915	32757,5182	30148,3499	3,5529	120593,3996
Coeficient asimetrie	-1,2001	22,4144	-1,2	27,8568	-1,2
Coeficient aplatizare	-6,2693E-05	-1,8843	1,2458E-05	-2,8654	1,2458E-05
Amplitudinea	592,293	1864,97	592,2924	20,8238	1184,5848
Valoarea minimă	6,107	192,73	3,7276	2,152	7,4552
Valoarea maximă	598,4	2057,7	596,02	22,9758	1192,04
Suma	29623,007	137932,73	29386,6192	1517,1498	58773,2384
Efectiv eşantion	98	99	98	98	98
Nivelul de încredere (95 %)	34,8113	36,0979	34,8112	0,3779	69,6223
		Ep4			
Valoare medie	308,4632	1349,9688	306,0715	14,9582	612,1435
Eroarea standard	17,8988	17,1794	17,8985	0,1904	35,7972
Valoare mediană	308,45	1328,05	306,075	14,715	612,145
Valoare modală	#N/A	1349	#N/A	14.948	#N/A
Abaterea standard	177,1894	170,0672	177,1865	1,8844	354,3740
Varianța (Dispersia)	31396,098	28922,8567	31395,05507	3,5511	125580,938
Coeficient asimetrie	-1,2	16,8925	-1,2	16,8918	-1,2
Coeficient aplatizare	-1,6958E-06	-0,7276	-1,9381E-05	-0,7276	-1,0031E-05
Amplitudinea	604,468	1724,46	604,4255	19,1075	1208,8709

Tabelul 6.9. (continuare)						
Valoarea minimă	6,232	325,04	3,8645	3,6015	7,7291	
Valoarea maximă	610,7	2049,5	608,29	22,709	1216,6	
Suma	30229,392	132296,94	29995,0045	1465,9035	59990,0601	
Efectiv eşantion	98	98	98	98	98	
Nivelul de încredere (95 %)	35,5242	34,0963	35,5236	0,3778	71,0475	
		Ep5				
Valoare medie	281,6864	1376,4629	279,323	15,1952	558,6459	
Eroarea standard	16,3451	15,7203	16,3448	0,1735	32,6897	
Valoare mediană	281,65	1380	279,32	15,2345	558,645	
Valoare modală	#N/A	1278,7	#N/A	14,116	#N/A	
Abaterea standard	161,8084	155,6229	161,806	1,718	323,6119	
Varianța (Dispersia)	26181,97	24218,503	26181,1942	2,9515	104724,7	
Coeficient asimetrie	-1,2	27,9257	-1,2	27,9238	-1,12	
Coeficient aplatizare	-1,9E-05	-1,695	1,5863E-05	-1,6948	1,87E-05	
Amplitudinea	552,009	1782,14	551,9657	19,6733	1103,892	
Valoarea minimă	5.691	314,76	3,3543	3,4747	6,7085	
Valoarea maximă	557,7	2096,9	555,32	23,148	1110,6	
Suma	27605,271	134893,36	27373,6548	1489,1287	54747,2935	
Efectiv eșantion	98	98	98	98	98	
Nivelul de încredere (95 %)	32,4405	31,2004	32,4401	0,3444	64,8801	

Pe baza rezultatelor încercării la tracțiune a epruvetelor cu și fără defect (Anexele A3\_1, A3\_2 și A3\_3) și a faptului că volumul unui eșantion este  $n \ge 30$ , conform [145], s-a aplicat *testul z* de analiză statistică aferent repartiției normale sau funcției Gauss-Laplace, cu scopul stabilirii influenței defectelor asupra rezistenței mecanice a materialului (PEHD) supus cercetărilor.

Testul z aferent repartiției normale sau funcției Gauss-Laplace este, conform [146], un test utilizat pentru compararea mediilor a două eșantioane. Prin testul z sunt verificate ipotezele statistice a căror formulare este concretizată în *ipoteza nulului* ( $H_0$ ) și *ipoteza alternativă* ( $H_1$ ). E2. Formularea ipotezelor statistice:

a) ipoteza nulului ( $H_0$ ): Nu există diferență între valorile medii ale rezistențelor mecanice înregistrate pentru epruvetele cu defect transversal/longitudinal și pentru epruveta fără defect,

b) ipoteza alternativă (H<sub>1</sub>): Există diferență între valorile medii ale rezistențelor mecanice înregistrate pentru epruvetele cu defect transversal/longitudinal și pentru epruveta fără defect;

Ca date de intrare au fost utilizate rezultate din tabelul 6.9 și rezultatele obținute în programul Excel, prin utilizarea z-Test: Two Sample for Means din Analysis Tools (Data Analisys) sunt redate în tabelele 6.11 și 6.12. În figura 6.22 este redată poziționarea valorii calculate,  $z_{calc}$ , în raport cu regiunile critice, respectiv valoarea  $z_{calc} = -2,6595$  pentru variabila 1 - Ep2 (T) și valoarea  $z_{calc} = -0$ , 9202 pentru variabila 1 - Ep4 (L).

pentru variabila 1 - Epz (1) şi variabila 2 - Eps (FD)						
Statistici rezumative		<b>Ep2</b> ( <b>T</b> )	<b>Ep5 (FD)</b>			
Media	Mean	14,3512	15,1952			
Varianța/dispersia	Known Variance	6,92	2,95			
Efectiv eşantion	Observations	98	98			
Diferența dintre medii în ipoteza nulului (H <sub>0</sub> )	Hypothesized					
	Mean Difference	0				
Valoarea calculată, <i>z<sub>calc</sub></i>	Z	- 2,6595				

 

 Tabelul 6.11. Rezultatele obținute prin utilizarea z-Test: Two Sample for Means din Analysis Tools pentru variabila 1 – Ep2 (T) și variabila 2 – Ep5 (FD)

Tabelul 6.11. (continuare)			
Nivelul de siguranță pentru testul unilateral	P(Z<=z) one-tail	0,0039	
Valoarea critică, <i>z<sub>crit</sub></i> , pentru testul unilateral	z Critical one-tail	1,6449	
Nivelul de siguranță pentru testul bilateral	P(Z<=z) two-tail	0,0078	
Valoarea critică, <i>z<sub>crit</sub></i> , pentru testul bilateral	z Critical two-tail	1,96	

**Tabelul 6.12.** Rezultatele obținute prin utilizarea z-Test: Two Sample for Means din Analysis Tools pentru variabila 1 - Ep4 (L) și variabila 2 - Ep5 (FD)

Statistici rezumative		Ep4 (L)	Ep5 (FD)
Media	Mean	14,9582	15,1952
Varianța/dispersia	Known Variance	3,55	2,95
Efectiv eşantion	Observations	98	98
Diferența dintre medii în ipoteza nulului (H <sub>0</sub> )	Hypothesized		
	Mean Difference	0	
Valoarea calculată, <i>z<sub>calc</sub></i>	Z	- 0, 9202	
Nivelul de siguranță pentru testul unilateral	P(Z<=z) one-tail	0,1787	
Valoarea critică, <i>z<sub>crit</sub></i> , pentru testul unilateral	z Critical one-tail	1,6449	
Nivelul de siguranță pentru testul bilateral	$P(Z \le z)$ two-tail	0,3575	
Valoarea critică, <i>z<sub>crit</sub></i> , , pentru testul bilateral	z Critical two-tail	1,9600	



*Fig. 6.22.* Poziționarea valorii calculate,  $z_{calc}$ , în raport cu regiunile critice: a) valoarea  $z_{calc} = -2,6595$ pentru variabila 1 - Ep2(T); b) valoarea  $z_{calc} = -0,9202$  pentru variabila 1 - Ep4(L)

Evaluarea numerică a comportării epruvetelor cu și fără defecte a fost realizată pe baza metodei elementelor finite, MEF, prin intermediul programului Ansys. Ansys este un program utilizat pe scară largă în industrie pentru a simula răspunsul unui sistem fizic la încărcarea structurală.

Tipul de analiză prin MEF ce corespunde cerințelor modelării comportamentului țevilor de PEHD este *analiza structurală*. Aceasta reprezintă determinarea stării de tensiune sau de deformație dintr-o structură solicitată.

Caracteristicile de material, introduse în etapa *ENGINEERING DATA* sunt cele din tabelul 6.13.

Nr. crt.	Proprietate material	Simbol	Valoare caracteristică material	Unitate de măsură
1.	Densitate	ρ	960	$[kg/m^3]$
2.	Modulul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young	E	1100	[MPa]
3.	Coeficientul de contracție transversală sau raportul lui Poisson	μ	0,45	-

 Tabelul 6.13. Caracteristici de material ale polietilenei PE100

În etapa *GEOMETRY* au fost realizate epruvetele supuse analizei și defectele realizate pe suprafețele acestora. Aspectele acestora sunt prezentate în figura 6.23.

În analiza numerică, în etapa *SOLUTION*, au fost obținute rezultate sub forma tensiunilor, prezentate în figurile 6.25*d*, 6.25*e* și 6.25*f* și sub forma deformațiilor, în figura 6.26*a*, 6.26*b* și 6.26*c*.



*Fig. 6.25. Etapele Setup și Solution ale analizei numerice aplicate epruvetelor cu și fără defecte supuse încercării la tracțiune: a*) și *e*) *Ep1; b*) și *f*) *Ep4; c*) și *g*) *Ep5* 



*Fig. 6.26.* Valorile deformației înregistrată prin simulare numerică pentru epruvetele cu și fără defecte supuse încercării la tracțiune: a) Ep1; b) Ep4; c) Ep5

Valorile parametrilor mecanici pentru epruvetele cu defect transversal sunt prezentate în figura 6.27, pentru epruvetele cu defect longitudinal în figura 6.28 și pentru epruveta fără defect în figura 6.29.



Fig. 6.27. Parametrii mecanici pentru epruvetele cu defect transversal Ep1 și Ep2

Outline	of Schematic A8: Parameters				▼ џ Х	Table o	f Design Points					
	А	В	с	D			В		с	D	E	
1	ID	Parameter Name	Value	Unit			P18 -	_	P19 - Plane4	P20 - Extrude 1	P24 - Plane4	
2	Input Parameters					1	XYPlane		.FD13	.FD1	.H4 🗖	1
3	🖃 🚾 The tensile test (A1)					2	mm	-	mm 💌	mm 🔻	mm 🔻	Γ.
4	ι <mark>ρ</mark> Ρ18	XYPlane.V13	9.94	mm 💌		3	9.94	_	9.01	9.01	4.6	1 c
5	🗘 P19	Plane4.FD13	9.01	mm 💌		4	10.05		8.98	8.98	4.6	C
6	<b>Гр</b> Р20	Extrude1.FD1	9.01	mm 💌		*		_				t
7	🗘 P24	Plane4.H4	4.6	mm 💌								
8	ι <mark>β</mark> Ρ26	Plane4.L6	0.3	mm 💌		Param	eter Chart 3					
9	<b>р</b> Р27	Extrude6.FD1	1	mm 💌						P19 - Plane4.FD13	[mm]	
*	P New input parameter	New name	New expression			MPa	8.98		8.985 8	.99 8.995	9	
11	<ul> <li>Output Parameters</li> </ul>						32.2					-
12	🖃 🚾 The tensile test (A1)					12,	2 15					
13	P21	Stress Intensity Maximum	31.936	MPa		la Xil						
14	P22	Total Deformation Maximum	1.2721	mm		2	32.1 -					
15	P23	Equivalent Stress Maximum	28.193	MPa		sis 3	2.05 -					
*	New output parameter		New expression			Inte	32					
17	Charts					ess						
18	Parameter Parallel Chart 0					Str.	1.95					
Properti	es of Design Points: Parameter Set				▼ -⊐ X	21	0.5		0.6	0.7	0.8	0
	A		В			1				P27 - Extrude6.FD	1 [mm]	

Fig. 6.28. Parametrii mecanici pentru epruvetele cu defect longitudinal Ep3 și Ep4



Fig. 6.29. Parametrii mecanici pentru epruveta fără defect Ep5

Determinările experimentale efectuate conform ISO 527-2 [132] pe epruvete cu și fără crestătură/defect au evidențiat câteva aspecte deosebit de importante:

a) în primul rând modul de deformare a epruvetelor sub solicitare axială a fost diferit. Astfel pentru epruvetele fără defect și cu defect longitudinal evoluția deformației a fost similară. În acest caz inițierea deformației plastice s-a produs în afara zonei cu defect, ea propagându-se pe întreaga zonă calibrată a acesteia până în momentul în care tensiunea normală a depășit valoarea critică de rupere. Se precizează, în acest caz, că defectul (crestătura) longitudinal a urmat cadrul general de deformare, el modificându-și substanțial lungimea inițială. Se poate constata însă că adâncimea defectului are influență asupra rezistenței la tracțiune, epruveta Ep3 care a avut un defect cu adâncimea de 1 mm s-a deformat mai puțin.

b) în ceea ce privește epruvetele cu defect (crestătura) transversal modul de comportare la solicitarea de tracțiune a fost următorul: inițierea deformației plastice s-a produs și în acest caz în afara zonei cu defect. Dezvoltarea deformației plastice s-a produs până în momentul în care aceasta a ajuns în zona defectului, moment în care s-a produs ruperea.

Analiza statistică realizată prin aplicarea testului bilateral z a evidențiat următoarele aspecte: a) prezența defectului transversal pe suprafața epruvetei Ep2 influențează valoarea medie a rezistenței mecanice înregistrată pentru această epruvetă. Această valoare este diferită de valoarea medie a rezistenței mecanice înregistrată pentru epruveta fără defect Ep5.

b) defectul longitudinal de pe suprafața epruvetei Ep4 nu influențează valoarea medie a rezistenței mecanice înregistrată pentru această epruvetă. Această valoare nu diferă de valoarea medie a rezistenței mecanice înregistrate pentru epruveta fără defect Ep5.

# 6.2. Considerații teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte, în condițiile încercării la presiune interioară

Performanțele mecanice ale țevilor PEHD care prezintă crestături de diferite forme și adâncimi sunt esențiale pentru evaluarea siguranței în exploatare [147].

Conform API 579-1/ASME FFS-1 [148], în evaluarea integrității unei structuri este indicat a se realiza o analiză pentru identificarea dimensiunii defectului critic și a ratei de creștere a acestuia. În analiza efectuată sunt utilizate criterii de acceptare precum:

- a) Factorul de rezistență reziduală/Remaining Strength Factor (RSF);
- b) Diagrama de evaluare a cedării/Failure Assessment Diagram (FAD) etc.

Criteriul de acceptare a) Factorul de rezistență reziduală este valabil și pentru Partea 12 a API 579-1/ASME FFS-1 [148], respectiv pentru combinația de *urmă de lovitură/adâncitură* și *smulgere*/dent-gouge.

*Factorul de rezistență reziduală*, RSF, reprezintă raportul dintre rezistența la rupere a țevii cu defect,  $\sigma_{r,defect}$ , și rezistența la rupere a țevii fără defect,  $\sigma_{r}$ , și se calculează cu relația (6.3).

$$RSF = \frac{\sigma_{r,defect}}{\sigma_r} \tag{6.3}$$

în care:

 $\sigma_{r,defect}$  – rezistența la rupere a țevii cu defect, [MPa];

 $\sigma_r$  – rezistența la rupere a țevii fără defect, [MPa].

Criteriul de acceptare b) Diagrama de evaluare a cedării este valabil numai pentru Partea 9 a API 579-1/ASME FFS-1 [148], respectiv pentru *defect asemănător fisurii*/crack-like flaw.

### 6.2.1. Considerații teoretice privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte, în condițiile încercării la presiune interioară

Utilitatea încercării la presiune interioară a țevilor din PEHD constă în verificarea funcționării conductelor și recepția acestora, oferind o imagine de ansamblu asupra comportării produsului.

Scopul realizării încercării la presiune interioară este de a determina presiunea de spargere și timpul până la cedarea corpului de probă, precum și identificarea tipului de rupere și a poziției acesteia, în condiții de testare date (temperatură, presiune, mediu).

Încercarea experimentală a fost orientată în principal spre determinarea comparativă a presiunii de spargere atât a țevilor fără defecte, cât și a țevilor cu defecte de tip lipsă de material, defecte realizate prin prelucrare mecanică.

Pentru o țeavă etanșă, asupra căreia nu acționează presiune externă, tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ , este determinată, conform [150], cu relația 6.4.

$$\sigma_c = \frac{R_i^2 \cdot P_i}{R_e^2 - R_i^2} \cdot \left(1 + \frac{R_e^2}{R_m^2}\right)$$
(6.4)

De asemenea, pentru o țeavă cu pereți subțiri, de diametru exterior,  $D_e$ , și grosime de perete, s, tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ , datorată presiunii interioare,  $P_i$ , este calculată cu ecuația lui Barlow 6.5, conform [151].

$$\sigma_c = \frac{P_i \cdot D_e}{2s} \tag{6.5}$$

Tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ , este dublul tensiunii longitudinale,  $\sigma_l$ , [151]. Tensiunea radială,  $\sigma_r$ , se calculează cu relația 6.6, conform [150].

$$\sigma_r = \frac{R_i^2 (R_m^2 - R_e^2)}{R_m^2 (R_e^2 - R_i^2)} \cdot P_i$$
(6.6)

în care:

 $\sigma_c$  – tensiunea circumferențială, [MPa];  $\sigma_l$  – tensiunea longitudinală, [MPa];

 $\sigma_r$  – tensiunea radială, [MPa];

 $R_e$  – raza exterioară, [mm];

 $R_i$  – raza interioară, [mm];

 $R_m$  – raza medie,  $R_m = (R_e + R_i)/2$ , [mm];

 $P_i$  – presiunea interioară, [MPa].

Pentru cazul  $R = R_e$ , la circumferința exterioară a țevii, tensiunea radială,  $\sigma_r = 0$ .

Valoarea tensiunii echivalente,  $\sigma_{ech}$ , care trebuie să îndeplinească condiția precizată în relația (4.42), din capitolul 4, în cazul  $R = R_e$ , se determină cu relația 6.7.

$$\sigma_{ech} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_c - \sigma_l)^2} \tag{6.7}$$

Într-o țeavă etanșă supusă numai la presiune interioară se creează o tensiune în direcția longitudinală, pe direcția capetelor țevii. Tensiunea creată determină întindere în direcție longitudinală ceea ce induce contracție în direcția perpendiculară, datorită efectului Poisson. Ca urmare, deformatia circumferentială este redusă datorită tensiunii longitudinale.

Deformația circumferențială,  $\varepsilon_c$ , pentru o țeavă, în cazul  $R = R_e$ , este redată în relația (6.8), conform [153].

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_c - \mu \cdot \sigma_l) \tag{6.8}$$

în care:

*E* – modulul de elasticitate longitudinal, [MPa];

 $\mu$  – coeficientul lui Poisson, [–].

# 6.2.2. Considerații experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, în condițiile încercării la presiune interioară

Defectul practicat în mod necontrolat corespunde mecanismului de deteriorare prezentat de API 579-1/ASME FFS-1 [148], în tabelul 2, în Partea 12, denumit combinație de *urmă de lovitură/adâncitură* și *smulgere*/dent-gouge.

Conform ASTM D 1599 [149] timpul de cedare pentru țeava-corpul de probă ar trebui să fie între 60 și 70 s sau, conform [154], spargerea apare într-o perioadă de maxim două minute.

# 6.2.2.1. Materiale utilizate la încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat

Corpurile de probă destinate programului experimental pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, sunt trei tronsoane de țeavă **PEHD apă**, **PE100 (\emptyset 90 × 5,4) SDR 17, PN 10 bar**, destinate rețelelor pentru distribuția apei potabile, montate subteran, cu lungime de 1000 mm.

Au fost pregătite trei probe: una fără defect și două cu defecte provocate.

Țeava fără defect (Țeava I) și țevile cu defect simulat (Țevile II și III) sunt prezentate în figura 6.30 și dimensiunile defectelor prezentate de Țeava II, respectiv Țeava III, sunt redate în tabelul 6.14.



**Fig. 6.30.** Corpurile de probă utilizate în cadrul încercării la presiune interioară: a) Țeava I – fără defect; b) Țeava II – cu defect; c) Țeava III – cu defect

Ţeava testată	Lungimea defectului în direcție longitudinală, [mm]	Lățimea defectului în direcție circumferențială, [mm]	Adâncimea defectului în direcție radială, [mm]
Ţeava II	50	26	1,2
Ţeava III	76	12	1,4

Tabelul 6.14. Dimensiunile defectelor prezentate de tevile II și III

# 6.2.2.2. Echipamentul utilizat la încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat

Pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, echipamentul necesar este specificat în EN ISO 1167-1 [119] și conține: capace pentru corpul de probă, cuvă, suporturi pentru corpul de probă și echipament de presurizare.

#### b. Instalația experimentală

Instalația experimentală este Echipamentul IPT, model 1751–0313, pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, echipament aflat în dotarea "Centrului regional de determinare a performanțelor și monitorizare a stării tehnice a material ului tubular utilizat în industria petrolieră" al UPG Ploiești (vezi fig. 6.32).



Fig. 6.32. Instalația experimentală utilizată pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă (vedere generală)

# 6.2.2.3. Modul de lucru al încercării la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat

Încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, se realizează conform ISO 1167-1 [119], ISO 1167-2 [155] și ASTM D 1599 [149].

Se pregătesc corpurile de probă. Numărul minim de țevi-corpuri de probă necesare pentru încercarea experimentală este trei.

Țevile-corpuri de probă supuse încercării la presiune interioară sunt redate în figura 6.33.



Fig. 6.33. Țevile-corpuri de probă supuse încercării la presiune interioară

# 6.2.2.4.1. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat

1. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevii I

În prezentul subcapitol, rezultatele sunt prezentate sub formă grafică având aspectul diagramelor presiune – timp, (bar – s), a diagramelor tensiune circumferențială-presiune interioară, a diagramelor tensiune circumferențială-deformație circumferențială și a diagramelor tensiuni-presiune interioară.

Rezultatele obținute pentru Țeava I sunt prezentate în figura 6.34 și în tabelul 6.15.



Fig. 6.34. Diagrama presiune – timp, (bar – s), pentru Ţeava I

Tahelul	6.15.	Rezultate	înregistrate	la testarea	tevii 1	fără defect	(FD)	
uvciui	0.15.	<i>Rezultule</i>	integistrate	iu iesiureu	icvii 1	juru uejeer	(I D)	

<b>Ţeava testată</b>	Presiunea de spargere, <i>P<sub>i</sub></i> , [bar]	Timpul de spargere, t, [s]
Teava I	38	77

2. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevii II

Rezultatele obținute pentru Țeava II sunt prezentate în figura 6.37.



*Fig.* 6.37. *Diagrame pentru Țeava II: a*)  $P_i - t$ ; *b*)  $\sigma_c - P_i$ ; *c*)  $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; *d*)  $\sigma_l - P_i$ 

3. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevii III Rezultatele obținute pentru țeava III sunt prezentate în figura 6.38.



Fig. 6.38. Diagrama presiune – timp, (bar – s), pentru Ţeava III

# 6.2.2.4.2. Interpretarea rezultatelor obținute la încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat

Pentru studiul comparativ al comportamentului țevilor fără și cu defecte practicate în mod necontrolat la încercarea la presiune interioară au fost realizate diagramele: presiune interioară – timp, tensiune circumferențială – presiune interioară, tensiune circumferențială – deformație circumferențială și tensiune longitudinală – presiune interioară (vezi fig. 6.40).



*Fig. 6.40.* Diagrame pentru studiul comparativ al comportamentului țevilor I, II și III la încercarea la presiune interioară: a)  $P_i - t$ ; b)  $\sigma_c - P_i$ ; c)  $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d)  $\sigma_l - P_i$ 

Ca și în [147], forma defectului și dimensiunile acestuia au avut o influență semnificativă asupra presiunii de spargere a țevilor PE100 [**156**].

Cu scopul realizării unui studiu comparativ, în tabelul 6.19 sunt redate valorile presiunii interioare,  $P_i$ , obținute prin încercarea experimentală, ale presiunii maxime,  $P_{max}$ , și ale presiunii de inițiere a fisurii,  $P_{fisură}$ , obținute prin utilizarea relațiilor de calcul (6.10) și (6.11), pentru țevile fără și cu defecte practicate în mod necontrolat. Cu aceste valori, prin înlocuire în relația (6.9), s-a calculat tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ . Valorile tensiunii circumferențiale,  $\sigma_c$ , au fost înlocuite în relația (6.3) pentru obținerea factorului de rezistență reziduală, *RSF*. Determinarea adâncimii admisibile a defectului,  $a_{adm}$ , din peretele țevilor II și III s-a realizat prin utilizarea relației de calcul (6.15).

**Tabelul 6.19.** Valori ale parametrilor caracteristici încercării la presiune interioară a țevilor fără șicu defecte practicate în mod necontrolat

Ţeava- corpul de probă	Presiunea interioară experimentală, <i>P<sub>i</sub></i> , [MPa]	Presiunea maximă, <i>P<sub>max</sub></i> , [MPa]	Presiunea de inițiere a fisurii, P <sub>fisură</sub> , [MPa]	Factorul de rezistență reziduală, <i>RSF</i> , [-]	Adâncimea admisibilă a defectului, <i>a<sub>adm</sub></i> , [mm]
Ţeava I	3,8	3,5805	-	-	-
Ţeava II	2,8	_	1,8939	0,7368	2,4922
Ţeava III	0,5	-	1,7586	0,1316	2,3915

6.3. Considerații teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple

## 6.3.1. Considerații teoretice privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple

Rețele de distribuție se exploatează relativ greu deoarece au lungime mare, pe anumite segmente sunt poziționate sub partea carosabilă și funcționează la parametrii tehnologici continuu variabili [163]. În aceste condiții, rezerva de capacitate portantă a conductelor din polietilenă ce alcătuiesc rețelele de distribuție este dificil de estimat.

În literatura de specialitate se utilizează două noțiuni aparent asemănătoare, dar cu domenii de aplicabilitate diferite și anume:

a) *tenacitatea materialelor* specifică materialelor considerate fără discontinuități fizice (goluri, fisuri etc.) și apreciată, în general, pe baza ariei suprafeței de sub curba caracteristică la tracțiune;

b) *tenacitatea la rupere a materialelor* specifică materialelor (elementelor de rezistență) care prezintă discontinuități fizice (goluri, fisuri etc.) [164].

Standardul britanic [122], prin cele două părți componente și anume: Part 1: *General requirements* și Part 2: *Summary of Nationally Established Methods of Design* reprezintă cadrul normativ necesar desfășurării încercării experimentale pentru evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple.

Cu scopul de a preveni ruperea conductelor aflate în exploatere, care prezintă defecte, se poate determina nivelul admisibil de solicitare al conductei,  $\sigma_{adm}$ , pe baza *factorului critic de intensitate a tensiunii*,  $K_c$ , și a dimensiunilor defectului/defectelor.

Factorul critic de intensitate a tensiunii corespunzător modului I de propagare prin deschidere a defectului,  $K_{Ic}$ , este o caracteristică de material care reprezintă capacitatea unui corp cu defect de a rezista tensiunilor ce acționează în jurul defectului și a fost determinat experimental în [4], obținânduse valoarea  $K_{Ic} = 0,743$  MPa·m<sup>1/2</sup>.

Factorul critic de intensitate a tensiunii,  $K_{Ic}$ , este util în verificarea condiției de neinițiere a procesului de rupere, redată prin relația (6.13).

$$K_I \le K_{Ic} \tag{6.13}$$

#### în care:

 $K_I$  – factorul de intensitate a tensiunii corespunzător modului I de propagare prin deschidere a defectului, [MPa·m<sup>1/2</sup>];

 $K_{Ic}$  – valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii, o caracteristică de material al țevii, [MPa·m<sup>1/2</sup>].

Expresia analitică a factorului de intensitate a tensiunii,  $K_I$ , pentru cazul unei țevi ce prezintă pe suprafața exterioară un defect semieliptic nepătruns (vezi fig. 6.42), a cărei deschidere se face după Modul I, este dată de relația 6.14 [4].

$$K_{I} = \sigma_{ech} \sqrt{\pi c \beta(a, L_{teava})}$$
(6.14)

în care:

 $\sigma_{ech}$  – tensiunea echivalentă, [MPa];

c – semilungimea defectului, măsurată în direcția în care defectul se extinde, [mm];

 $\beta$  – coeficient ce depinde de dimensiunile defectului și ale piesei care o conține;

*a* – adâncimea defectului, [mm];

 $L_{teava}$  – lungimea de țeavă ce conține defectul, [mm].



Fig. 6.42. Secțiune într-o țeavă PE100 cu defect semieliptic nepătruns

# 6.3.2. Considerații experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple

# 6.3.2.1. Materiale utilizate la încercarea la solicitări multiple a țevii din polietilenă PE100 îngropată

#### a. Ţeava

Ţeava din polietilenă PE100 utilizată pentru încercarea la solicitări multiple (vezi fig. 6.43) a avut următoarele caracteristici dimensionale și de material: diametrul țevii,  $D_e = 90$  [mm]; grosimea țevii, s = 5,4 [mm]; lungimea țevii,  $L_t = 4000$  [mm]; densitatea materialului țevii,  $\rho_{PE100} = 960$  [kg/m<sup>3</sup>].



Fig. 6.43. Țeava din polietilenă PE100 utilizată pentru încercarea la solicitări multiple

#### 6.3.2.2. Echipamente folosite

În încercarea la solicitări multiple a țevii din polietilenă PE100 îngropată a fost utilizată pompa manuală de testare presiune Rems Push (vezi fig. 6.46*a*), cu presiune maximă 160 bar (vezi fig. 6.46*b*), stivuitorul diesel Shangli CPCD30 (vezi fig. 6.47) și instalația experimentală utilizată pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă (vezi fig. 6.29).



Fig. 6.46. Pompa manuală de testare presiune Rems Push: a) vedere generală; b) detaliu

# 6.3.2.3. Modul de lucru al încercării la solicitări multiple a țevii din polietilenă PE100 îngropată

Țevile și fitingurile din polietilenă PE100 ar trebui să fie îngropate în conformitate cu ASTM D2774 [160] și cu recomandările din [21], pentru sisteme sub presiune.

Țevii din polietilenă PE100 utilizată în încercarea experimentală i s-au aplicat capace cu scopul asigurării etanșării capetelor ... .

Ulterior, țeava a fost poziționată pe bancul de lucru pentru a se realiza pe suprafața acesteia reprezentarea grafică a reperelor cu scopul identificării poziției exacte a defectelor produse în faza instalării în șanț. Distanța dintre două repere verticale consecutive – pe lungimea țevii – a fost de 30 mm (vezi fig 6.49a) și distanța dintre două repere orizontale – pe circumferința țevii – a fost de 40 mm (vezi fig. 6.49b). Au fost trasate repere verticale de la 1 la 50 și repere orizontale de la A la H (vezi fig. 6.49c).



Fig. 6.49. Realizarea reprezentării grafice a reperelor pe suprafața țevii PE100: a) trasarea reperelor verticale; b) trasarea reperelor orizontale; c) aspectul final al reprezentării grafice a reperelor trasate pe suprafața exterioară a țevii PE100

În figura 6.51 este prezentată suprapunerea tuburilor metalice peste țeava din polietilenă PE100 cu scopul simulării suprasarcinii din trafic.



Fig. 6.51. Aplicarea unei sarcini exterioare (122,3963 kg), în zona cu defect, pentru simularea suprasarcinii localizate, din trafic

După realizarea etapei de simulare a suprasarcinii din trafic, a avut loc examinarea nedistructivă a țevii din polietilenă PE100, realizată prin control vizual. În timpul examinării au fost identificate defecte de tip lipsă de material precum amprentă (fig. 6.52*a*), zgârietură (fig. 6.52*b*) și microfisură (fig. 6.52*c*), poziționate pe suprafața exterioară a țevii.



Fig. 6.52. Defecte de tip lipsă de material identificate pe suprafața exterioară a țevii PE100: a) amprentă; b) zgârietură; c) microfisură

Localizarea și descrierea defectului reprezintă cerințe în redactarea unui raport de încercare experimentală. În acest sens, defectul a fost poziționat în spațiul GH 23-26 (vezi fig. 6.53), a avut aspectul unei zgârieturi, cu lungimea de 9 mm și adâncimea de 1,2 mm.

După solicitarea la presiune interioară a țevii (vezi fig. 6.54) s-a constatat că defectul identificat sub formă de zgârietură, prezentat în figura 6.52*b*, a fost defectul care a cauzat spargerea țevii.



Fig. 6.54. Solicitarea la presiune interioară a țevii

Țeava din polietilenă PE100 supusă încercării la solicitări multiple a fost evaluată numeric printr-un studiu realizat în programul Ansys.

Scopul evaluării numerice a fost evaluarea influenței defectului identificat asupra rezistenței mecanice a țevii testate. În acest sens, valorile adâncimii defectului au fost majorate consecutiv de la 10 % până la 70 % din grosimea de perete a țevii, s. Același procedeu a fost aplicat și lungimii defectului, aceasta fiind majorată consecutiv de la 10 % până la 70 % din lungimea țevii,  $L_t$ .

# 6.3.2.4. Rezultate obținute la evaluarea țevii din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple și interpretarea acestora

# 6.3.2.4.1. Rezultate obținute la evaluarea țevii din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple

Ruperea țevii din polietilenă s-a produs prin umflarea locală, în jurul defectului identificat ca fiind amplasat în spațiul GH 23-26, concomitent cu subțierea peretelui până la cedare (vezi fig. 6.57). Lungimea porțiunii din țeavă ce a fost afectată de spargere a fost de 35 mm.



Fig. 6.57. Ruperea țevii din polietilenă PE100 evaluată în condițiile unor solicitări multiple

Valorile presiunii de spargere și ale timpului de spargere înregistrate pentru țeava din polietilenă PE100 evaluată în condițiile unor solicitări multiple sunt prezentate sub forma diagramei presiune-timp (bar-s) redată în fig. 6.58.



*Fig. 6.58.* Diagrama presiune-timp, (bar – s), pentru țeava din polietilenă PE100 evaluată în condițiile unor solicitări multiple

În analiza numerică, în etapa *SOLUTION*, au fost obținute rezultate sub forma tensiunilor, a deformațiilor și a tensiunilor echivalente, prezentate în figura 6.60.



*Fig. 6.60. Rezultate obținute în etapa SOLUTION a analizei numerice: a) valori ale rezistenței mecanice; b) valori ale defromațiilor; c) valori ale tensiunii echivalente* 

Pentru prezentarea valorilor maxime ale parametrilor Stress Intensity, Equivalent Stress, Directional Deformation și analiza influenței defectelor asupra rezistenței mecanice a țevii PE100 evaluată în condițiile unor solicitări multiple sunt redate printscreen-uri cu valorile modificate ale

adâncimii defectului, *a*, (vezi fig. 6.61) și cu valorile modificate ale lungimii defectului, 2*c*, (vezi fig. 6.62) și, implicit valorile modificate ale parametrului Stress Intensity.



Fig. 6.61. Analiza parametrilor - modificare adâncime defect

Outline	of Schematic A8: Parameters					<b>▼</b> ₽	×	Table of	Design Point	ts									ł X
	A	В	с	D					Α	В		С	D	E	F	G	н	I	
1	ID	Parameter Name	Value	Unit								P2 -	P26 -	P27	P30	P31	P32 -	P29 - Stress	5
2	Input Parameters						ш	1	N 💌	P1	•	ХҮР 💌	Pla 💌	P 💌	E 💌	R 💌	interi	Intensity	•
3	🖃 🚾 teava cu defect (A1)						L L					.s	.H1	.V1	.FD1		Magn	Maximum	
4	ι <mark>ρ</mark> Ρ1	XYPlane.De	90	mm	-			2	Units	mm	•	mm 💌	mm 💌	mm 💌	mm 💌	d 💌	MPa 💌	MPa	
5	<b>ф</b> Р2	XYPlane.s	5.4	mm	-		ш	3	DP 0	90		5.4	9	1.2	250	2	3.3	19.937	
6	¢р Р26	Plane 11.H1	9	mm	-		LH	4	DR 1	00	$\rightarrow$	E 4	10	12	250	2	2.2	10.024	-
7	<b>ф</b> Р27	Plane 11.V1	1.2	mm	-		LH	** E	DP 3	90	$\rightarrow$	5.4	15	1.2	250	2	3.3	10.078	-
8	<b>β</b> P30	Extrude 1.FD 1	250	mm	-		ΗĐ	5	DP 4	90	-	5.4	20	1.2	250	2	3.3	23.453	-
9	<b>β</b> P31	Revolve13.FD1	2	degree	-		LH	7	DP 5	90	$\rightarrow$	5.4	25	1.2	250	2	3.3	21.548	-
10	🗘 P32	Presiunea interioară Magnitude	3.3	MPa	-		Lh	8	DP 6	90	-	5.4	30	1.2	250	2	3.3	21.888	-
*	lp New input parameter	New name	New expression				Lh	9	DP 7	90	-	5.4	70	1.2	250	2	3.3	21.872	-
12	Output Parameters																		_
13	🖃 🚾 teava cu defect (A1)									•									_
14	P29	Stress Intensity Maximum	19.937	MPa															
15	P33	Equivalent Stress Maximum	17.315	MPa															
16	P34	Directional Deformation Maximum	0.54475	mm															
	New output parameter		New expression					Param	eter Chart 2									× +	×
18	Charts						1	Pa											e di
19	N Parameter Chart 1							-		7	<u></u>								ona
20	Parameter Chart 2								3 -	/								· 5.448	R
Propert	es of Outline A19: 0					₹ џ	×	Maxi		/ V		$\setminus$ /							form
	A		В					Ai 2	<sup>2</sup> 1 1	X		V						<u> </u>	atio
1	Property		Value					tens	11/	- / \		/							M
2	Parameter Chart: General							⊆ 2 vi	1 ·   /		$\mathcal{V}$							5.447	axin
3	Exclude Current Design point							tres	V										n n
4	X-Axis (Bottom)	P26 - Plane 11.H1				1	•	0, 2	0 - 00	-0								B- 5 4465	-
5	X-Axis (Top)						•	P29	10		20	3	0	40	50		60	70	10-
6	Y-Axis (Left)	P29 - Stress Intensity Maximum					•						P26 - Plar	nell.Hl [r	mm]				
7	Y-Axis (Right)	P34 - Directional Deformation Ma	ximum				•												<u>1</u>

Fig. 6.62. Analiza parametrilor - modificare lungime defect

# 6.3.2.4.2. Interpretarea rezultatelor obținute la evaluarea țevii din polietilenă în condițiile unor solicitări multiple

Valoarea determinată a factorului de intensitate a tensiunii, în cazul țevii din polietilenă evaluată în condițiile unor solicitări multiple, ..., respectiv  $K_I = 0,7007$  MPa·m<sup>1/2</sup>. Această valoare este inferioară valorii critice determinate de [4], respectiv  $K_{Ic} = 0,743$  MPa·m<sup>1/2</sup>. În acest caz este îndeplinită relația 6.16.

Prin evaluarea numerică, pentru defectul de tip zgârietură, poziționat în spațiul GH 23-26, cu lungime de 9 mm și adâncime de 1,2 mm, s-a obținut valoarea rezistenței mecanice a țevii (a tensiunii maxime dezvoltată în peretele țevii) de 19,937 MPa.

6.4. Considerații teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte practicate în mod controlat, în condițiile încercării la presiune interioară

6.4.1. Considerații teoretice privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte practicate în mod controlat, în condițiile încercării la presiune interioară

Defectele practicate în mod controlat sunt defecte volumetrice, dispuse pe suprafața exterioară a țevii și orientate pe direcție circumferențială, respectiv pe direcție longitudinală, caracterizate de valori ale lungimii diferite și ale adâncimii identice (...). Defectele corespund tipului de defect obținut prin mecanismului de deteriorare prezentat de API 579-1/ASME FFS-1 [148], în tabelul 2, în Partea 9, denumit *defect asemănător fisurii*/crack-like flaw.

Pentru evaluarea integrității structurale a țevilor cu pereți subțiri, sub presiune, se poate folosi tensiunea echivalentă,  $\sigma_{ech}$ . Deoarece defectul este situat pe suprafața exterioară a țevii, tensiunea radială,  $\sigma_r$ , are valoarea zero. Tensiunea echivalentă,  $\sigma_{ech}$ , se calculează cu relația 6.7, adaptată pentru tensiunea radială  $\sigma_r = 0$ .

# 6.4.2. Considerații experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă ce prezintă defecte practicate în mod controlat, în condițiile încercării la presiune interioară

### 6.4.2.1. Materiale utilizate la încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat

Pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat, sunt utilizate trei tronsoane de țeavă **PEHD apă**, **PE100 (Ø 90 × 5,4) SDR 17, PN 10 bar**, cu lungime de 300 mm, tăiate din țeavă destinată rețelelor pentru distribuția apei potabile.

Cele trei probe – țeava fără defect (țeava I.1), țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) și țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L) sunt prezentate în figura 6.64.



**Fig. 6.64.** Țevi fără și cu defecte practicate în mod controlat supuse încercării la presiune interioară: a) țeava fără defect (țeava I.1); b) țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C); c) țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L)

# 6.4.2.2. Echipamentul folosit în cadrul încercării la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat

Echipamentul folosit în cadrul încercării la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat este constituit din echipamentul de testare a țevilor presurizate (echipament precizat și descris anterior pentru încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat) și din echipamentul de prelucrare a crestăturilor, ce include freza disc unghiular simetrică în V exterior (vezi fig. 6.10).

# 6.4.2.3. Modul de lucru al încercării la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat

În cazul încercării experimentale, țeava a fost umplută cu apă sub presiune, la temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}$ C, prin alimentare la unul dintre capete.

Timpul încercării la presiune interioară a fost înregistrat, fiind surprinse momentele apariției cedării/spargerii și distrugerii (pierderea presiunii) țevilor.

# 6.4.2.4. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevilor cu defecte practicate în mod controlat și interpretarea acestora

# 6.4.2.4.1. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevilor cu defecte practicate în mod controlat

1. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevii cu fără defect (țeava I.1)

Rezultatele obținute pentru țeava I.1 (FD) sunt prezentate ... în tabelul 6.23.

Știind că pentru conductele supuse presiunii interioare, alcătuite din țevi cu pereți subțiri, solicitarea principală este tensiunea circumferențială,  $\sigma_c$ , pentru calculul acesteia fost utilizată relația 4.32, iar pentru calculul tensiunii longitudinale,  $\sigma_l$ , a fost utilizată relația 4.29 din capitolul 4 al prezentei lucrări.

1 ubetut 0.25. K	ezanare integistrare la restarea je	vii juru uejeci (jeuvu 1.1)
<b>Ţeava testată</b>	Presiunea de spargere, <i>P<sub>i</sub></i> , [bar]	Timpul de spargere, t, [s]
Ţeava I.1	40	58

Tabelul 6.23. Rezultate înregistrate la testarea țevii fără defect (țeava I.1)

2. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevii cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C)

Rezultatele obținute pentru țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) sunt prezentate în figura 6.67, ... .

- I man de f	ne presidente		Juna da s	
d Into de l		10 3 T 8		
50 -jF				 
Pre	Contraction of the	ANT THE R. D. P. STREET, ST.		 Sector States
Pre 40	A MORESSICION STORE			
30 -		A	······	
20 3	Contraction in the	A		
Du	and a state of the	( )		
10-		t.		

*Fig. 6.67.* Diagrama presiune – timp, (bar – s), pentru țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C)

3. Rezultate obținute la încercarea la presiune interioară a țevii cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L)

Rezultatele obținute pentru țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L) sunt prezentate în ..., în figura 6.70 ... .



**Fig. 6.70**. Diagrame pentru țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L): a)  $P_i - t$ ; b)  $\sigma_c - P_i$ ; c)  $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d)  $\sigma_l - P_i$ 

Țevile fără și cu defecte practicate în mod controlat, sparte în încercarea la presiune interioară, sunt prezentate în figura 6.71.





Studiul comparativ al comportamentului țevilor fără și cu defecte practicate în mod controlat supuse încercării la presiune interioară poate fi realizat cu ajutorul diagramelor: presiune interioară–

timp (bar – s), tensiune circumferențială – presiune interioară, tensiune circumferențială – deformație circumferențială și tensiune longitudinală – presiune interioară (vezi fig. 6.72).



*Fig. 6.72.* Diagrame pentru studiul comparativ al comportamentului țevilor: I.1; II.2C și III.3L la încercarea la presiune interioară: a)  $P_i - t$ ; b)  $\sigma_c - P_i$ ; c)  $\sigma_c - \varepsilon_c$ ; d)  $\sigma_l - P_i$ 

Conform [165], utilizarea diagramei de evaluare a cedării/Failure Assessment Diagram (FAD) se realizează în coordonate  $L_r - K_r$ .

Pentru nivelul 2 de evaluare, conform API 579-1/ASME FFS-1 [148], pentru trasarea diagramei FAD se utilizează curba ce redă dependența dintre raportul tenacității,  $K_r$ , și raportul încărcării,  $L_r$ , prin relația 6.21 [165].

$$K_r = [1 - 0.14(L_r)^2] \{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r)^6]\}$$
(6.21)

Diagrama FAD este reprezentate în figura 6.73. În diagramă se observă cele două regiuni de operare: sigură și potențial nesigură, precum și poziționarea pe curba diagramei a celor două perechi de puncte  $(L_r, K_r)$  corespunzătoare celor două defecte de pe suprafața exterioară a țevilor II.2C și III.3L.



Fig. 6.73. Diagrama FAD (prelucrare după [165])

Ţevile I.1, II.2C și III.3L au fost supuse evaluării numerice prin metoda elementului finit, în programul Ansys.

Pentru a pune în evidență influența defectului asupra rezistenței mecanice a țevilor din polietilenă cu defecte practicate în mod controlat, atât adâncimea cât și lungimea defectelor au fost majorate de la 10 % la 70 % din aceleași dimensiuni ale țevilor respective.

În etapa *GEOMETRY* a fost utilizată reprezentarea în programul AutoCAD a defectului în plan, redată în figura 6.74*a*, schița defectului realizată în *DesignModeler* din figura 6.74*b* și secvențe din etapa *MESH* din figura 6.74*c* și 6.74*d*.

În etapa *ENGINEERING DATA* au fost utilizate aceleași caracteristici de material ale polietilenei PE100 ca în tabelul 6.13.

Încărcarea țevii a fost presiunea interioară, valorile introduce fiind de 4MPa pentru țeava I.1, 2,8 MPa pentru țeava II.2C și 1,2 MPa pentru țeava III.3L.

Etape ale evaluării numerice a țevilor fără și cu defecte practicate în mod controlat sunt prezentate în figura 6.74e - g.





Ing. Ioana-Daniela Manu



(*g*)

Fig. 6.74. Etape ale evaluării numerice: a) schița defectului realizată în AutoCAD;
b) schița defectului realizată în DesignModeler; c) dimensionarea defectului; d) discretizarea modelului
e) țeava fără defect (țeava I.1); f) țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C);
c) țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava II.3L)

# 6.4.2.4.2. Interpretarea rezultatelor obținute la încercarea la presiune interioară a țevilor cu defecte practicate în mod controlat

Valorile presiunilor și ale timpilor de spargere înregistrate la încercarea la presiune interioară a țevilor cu defecte practicate în mod controlat sunt diferite. Pentru țeava cu defect longitudinal au fost înregistrate cele mai mici valori ale parametrilor caracteristici prezentați anterior.

Așa cum se poate observa în figura 6.64b și figura 6.64c o crestătură orientată longitudinal (caz în care tensiunile principale sunt perpendiculare pe conturul crestăturii în direcția axei mari) va conduce la o cedare mai rapidă a țevii decât în cazul în care crestătura/defectul este circumferențial.

În figura 6.75 este prezentată analiza parametrilor pentru țeava II.2C, în condițiile modificării adâncimii defectului, *a*.

În figura 6.76 se redă analiza parametrilor pentru țeava II.2C, în condițiile modificării lungimii defectului, 2c.

Se poate observa că în cazul țevii II.2C atât creșterea adâncimii defectului, cât și creșterea lungimii defectului determină creșterea semnificativă a tensiunii mecanice din peretele țevii.



Fig. 6.75. Analiza parametrilor – teava II.2C – modificare adâncime defect



Fig. 6.76. Analiza parametrilor – teava II.2C – modificare lungime defect

Din analiza diagramelor reprezentate în figura 6.79 se observă că tensiunea maximă variază polinomial cu dimensiunile defectului.

Pentru țeava II.2C (cu defect circumferențial) a fost calculată, cu programul Wolfram Alpha: Computational Intelligence, *adâncimea critică a defectului*, *a<sub>crit</sub>*, prin înlocuirea în ecuația de dependență din relația (6.22), considerând tensiunea maximă a țevii fără defect, respectiv  $\sigma_{max} = 37,976$  MPa.

$$2,6667a_{crit}^2 - 5,5808a_{crit} + 28,785 = 37,976$$
(6.22)

Valoarea determinată a adâncimii critice a defectului este  $a_{crit} = 3,1775$  mm.

#### 6.5. Degradarea, ruperea și estimarea duratei de viață a țevilor din polietilenă

#### 6.5.1. Degradarea țevilor din polietilenă

Degradarea polietilenei este un fenomen extrem de complex și reprezintă îngrijorarea multor cercetători din domeniu [166], [167], [168].

În general, cazurile specifice degradării polietilenei sunt: formarea structurilor reticulate, degradarea termică, degradarea termomecanică și degradarea în mediu ambiant.

1. Conform [166], căile de degradare ale polimerilor sunt atribuite, în esență, *formării de radicali macromoleculari* – rezultatul acțiunii unor forțe motrice exterioare (temperatura, stresul mecanic, radiațiile etc.) – și reacțiilor acestor radicali cu macromoleculele polimerului și cu oxigenul. Produsele reacțiilor respective devin macromolecule stabile ce influențează dramatic scăderea greutății moleculare, prezența ramificării și formarea structurilor reticulate.

2. Degradarea termică a polietilenei se bazează pe reacții de tip scindare aleatorie [167].

3. *Degradarea termomecanică* a polietilenei constă în diminuarea valorică a proprietăților de material datorată acțiunii simultane a temperaturilor ridicate și solicitărilor mecanice.

4. *Degradarea în mediu ambiant* a țevilor din polietilenă utilizate în sistemul de distribuție a apei se manifestă, în general, după o utilizare pe termen lung în prezența unui dezinfectant – dioxidul de clor [167].

#### 6.5.2. Ruperea țevilor din polietilenă

Polietilena trece printr-un proces de modificare a caracteristicilor fizico-mecanice sub influența unor factori fizici și chimici și, ca urmare, structura polietilenei poate prezenta modificări în urma reacțiilor de degradare (rupere a catenelor principale) sau a reacțiilor de reticulare (formare a structurii tridimensionale) [55].

Mecanismul de rupere a polimerilor implică următoarele trei etape:

a) sub acțiunea sarcinii mecanice exterioare se realizează *excitarea mecanică a legăturilor interatomice*;

b) sub acțiunea fluctuațiilor termice are loc scindarea legăturilor excitate și supratensionate și formarea fisurilor submicroscopice (microfisuri născânde);

c) contopirea fisurilor submicroscopice în fisuri mai mari (fisuri magistrale) prin propagarea cărora se finalizează ruperea macroscopică, însoțită de crearea unor noi suprafețe.

Ruperea macroscopică a unei epruvete se poate realiza în două etape:

a) nuclearea fisurii magistrale;

b) propagarea fisurii magistrale prin epruvetă.

Cercetări detaliate privind formarea radicalilor liberi în fibrele semicristaline în condițiile întinderii uniaxiale au fost realizate pe *modelul lui Peterlin*. Acest model propune *modelul microfibrilar al structurii fibrelor* al cărui element structural de bază îl constituie *microfibrila* [171].

Reprezentarea modelului lui Peterlin, conform [172], este redată în figura 6.81.



Fig. 6.81. Modelul lui Peterlin (preluare din [172])

În funcție de tensiunea circumferențială și de timpul de spargere înregistrate la încercarea la presiune interioară a țevilor din polietilenă, s-au evidențiat trei etape caracteristice ruperii, conform [169], prezentate în figura 6.83.



Fig. 6.83. Etape caracteristice ruperii țevilor din polietilenă (prelucrare după [169])

#### 6.5.2.1. Ruperea țevilor din polietilenă fără defecte

Din punct de vedere al caracterului ruperii, experimental, prin încercarea la presiune, s-au evidențiat două tipuri de ruperi: fragilă și ductilă.

**Ruperea fragilă** apare după durate mari de solicitare. Ruperea țevii se produce fără o deformare importantă a acesteia, prin dezvoltarea de fisuri ce au o direcție longitudinală în raport cu axa țevii. Aceste fisuri sunt foarte fine și se închid după eliberarea presiunii din țeavă. Un exemplu de rupere fragilă, conform [173] este cea ilustrată în figura 6.84.



Fig. 6.84. Rupere fragilă: a) preluare din [173]; b) rezultat al încercării la presiune interioară a țevii I fără defect

#### 6.5.2.2. Ruperea țevilor din polietilenă ce prezintă defecte

Defectele reale de tipul incluziunilor, crăpăturilor, amprentelor, micro și macrofisurilor etc., prin dimensiunea lor caracteristică, afectează comportamentul de durată al materialului țevilor din polietilenă prin reducerea rezistenței la tracțiune minim garantată, *MRS*, respectiv durata de exploatare în condiții de siguranță.

**Ruperea ductilă** apare la presiuni mari după perioade scurte de solicitare. În acest caz ruperea se produce prin umflarea țevii concomitent cu subțierea peretelui acesteia până la cedare. Tipul acesta de rupere este denumit "cioc de papagal". Fisura produsă poate avea aceiași direcție cu axa țevii (vezi fig. 6.86*a* și 6.86*c* sau o direcție perpendiculară pe axa țevii (vezi fig. 6.86*b* și 6.86*d*).



Fig. 6.86. Rupere ductilă: a) rezultat al încercării țevii din polietilenă PE100 la solicitări multiple;
b) preluare din [13]; c) țeavă cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L);
d) preluare din [173]

#### 6.5.3. Estimarea duratei de viață a țevilor din polietilenă

Stabilirea duratei de viață a țevilor din polietilenă utilizate în rețelele de distribuție a apei depinde de valoarea presiunii interioare,  $P_i$ , la care sunt solicitate. În funcție de presiunea interioară se determină *tensiunea circumferențială admisibilă*,  $\sigma_{c,adm}$ , și *durata de exploatare*, *t*.

Din încercarea la presiune interioară de scurtă durată a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, descrisă în subcapitolul 6.2 al prezentei lucrări, s-a stabilit că o țeavă din polietilenă PE100 fără defecte rezistă unei presiuni interioare,  $P_i$ , cu valoarea de până la 3,8 MPa, într-un timp de 77 s (Țeava I). Această presiune de spargere este denumită *presiune critică*,  $P_{cr}$ , și corespunde unui *timp critic*,  $t_{cr}$  [175].

Pentru țevile din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, valorile înregistrate ale presiunii critice,  $P_{cr}$ , au fost de 2,8 MPa (pentru un timp critic,  $t_{cr} = 47$  s) – Țeava II și, respectiv de 0,5 MPa (pentru un timp critic,  $t_{cr} = 33$  s) – Țeava III.

Adâncimea defectului a fost caracteristica geometrică a defectului care a influențat în principal, presiunea de spargere – presiune critică. Celelalte două caracteristici geometrice, respectiv dimensiunile longitudinale și circumferențiale ale defectului, au avut o contribuție mai redusă asupra valorii presiunii [156].

În cazul încercării la presiune interioară a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat, valorile înregistrate ale presiunii critice,  $P_{cr}$ , și ale timpului critic,  $t_{cr}$ , sunt prezentate în tabelul 6.27.

Cod țeavă	Presiune critică, <i>P<sub>cr</sub></i> , [MPa]	Timp critic, <i>t<sub>cr</sub></i> , [s]
Ţeava fără defect (țeava I.1)	4	58
Ţeava cu defect în direcție circumferențială (țeava II.2C)	2,8	29
Ţeava cu defect în direcție longitudinală (țeava III.3L)	1,2	28

*Tabelul 6.27.* Valori presiune critică – timp critic

Prin utilizarea relațiilor 6.12, 6.13 și 6.14, valorile maxime ale tensiunii circumferențiale,  $\sigma_c$ , pentru cele trei țevi supuse încercării experimentale precizate anterior sunt: pentru țeava fără defect (țeava I.1)  $\sigma_c = 14,819$  MPa, pentru țeava cu defect în direcție circumferențială (țeava II.2C):  $\sigma_c = 13,1739$  MPa și pentru țeava cu defect în direcție longitudinală (țeava III.3L):  $\sigma_c = 13,0046$  MPa.

Durata de viață, t, reprezintă unul dintre factorii de care depinde eficiența sistemului de conducte din polietilenă utilizate la distribuția apei. Formula de determinare a duratei de viață, conform [4], este prezentată în relația (6.23).

$$t = \int_{a}^{s} \frac{da}{5,54 \cdot 10^{-8} \cdot K_{I}^{4,66}}$$
(6.23)

Pentru determinarea exactă a duratei de viață a țevii cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) și a țevii cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L) supuse încercării la presiune interioară a fost luat în considerare numărul de 8760 ore/an.

**Tabelul 6.28.** Durata de viață a țevii cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) și a țevii cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L) supuse încercării la presiune

Diametrul mediu al țevii	Adâncime defect	Lungime defect	Jumătate din lungimea defectului	Raza medie	Grosimea de perete	Raport	Factorul de corecție Folias
$D_m$	а	L <sub>defect</sub>	С	$R_m$	S	λ	$M_T$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]
0.00	0,0017	0,0022	0,0011	0.0422	0.0054	0,0738	1,0044
0,09	0,0017	0,0027	0,00135	0,0423	0,0054	0,0738	1,0044
Factor de	Unghiul	Modulul eliptic sau	Integrala eliptică	Factor de depinde	Tensiunea	Factorul de	Durata de
corecție	defectului	excentricitat ea	completă de gradul doi	de geometria defectului	maximă	a tensiunii	viață
corecție <i>M<sub>TM</sub></i>	defectului	excentricitat ea e <sub>f</sub>	completă de gradul doi Φ	de geometria <u>defectului</u> <i>M<sub>F</sub></i>	maximă σ	a tensiunii <i>K<sub>I</sub></i>	viață t
corecție 	defectului φ[°]	excentricitat ea e <sub>f</sub> [-]	completă de gradul doi <u>•</u> [-]	de geometria defectului $M_F$ [-]	maximă σ [MPa]	intensitate a tensiunii $K_I$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	t [ani]
<b>corecție</b> <u>M<sub>TM</sub></u> [-] 1,0009	defectului  [°] 3,94	excentricitat ea e <sub>f</sub> [-] 1,0264	<b>completă de</b> <b>gradul doi</b> Φ [-] 0,7549	de geometria defectului M <sub>F</sub> [-] 0,953	<b>παχίmă</b> <b>σ</b> [MPa] 13,0046	intensitate a tensiunii $K_I$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ] 0,5986	t [ani] 83,3164

#### 6.6. Concluzii

În capitolul numărul 6, intitulat CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND EVALUAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE ȚEVILOR DIN POLIETILENĂ FOLOSITE LA REALIZAREA SISTEMELOR DE CONDUCTE UTILIZATE PENTRU DISTRIBUȚIA APEI, ÎN PREZENȚA DEFECTELOR sunt prezentate aspecte legate de evaluarea modului în care defectele sau discontinuitățile geometrice locale, care sunt inevitabile la conductele din polietilenă, determină concentrarea locală a tensiunilor și, implicit, influențează comportarea mecanică a acestora. Programul experimental propus de autoarea tezei de doctorat, s-a bazat atât pe utilizarea unor metode de încercare standardizate (a se vedea încercarea la tracțiune) cât și pe simularea unor situații care pot apărea în practica montării sau funcționării sistemelor de conducte din PE. Experimentele au fost completate cu analize statistice ale rezultatelor obținute și cu modelări numerice ale situațiilor dezvoltate prin programul de încercări. Din interpretarea tuturor rezultatelor obținute, s-au desprins următoarele concluzii:

1. Analiza condițiilor în care se produce deformarea și ruperea unui material urmărește stabilirea legăturii cantitative dintre forțele exterioare, geometria corpului, inclusiv dimensiunile defectului, și caracteristicile de material.

3. Defectul existent într-o țeavă presurizată determină apariția concentrării de tensiune, faptul explicat prin aceea că tensiunea circumferențială trebuie să fie suportată de o grosime de perete redusă.

4. Încercarea la tracțiune realizată pe epruvete prelucrate din eșantioane prelevate din țevi din polietilenă a fost orientată către realizarea unei analize comparative între epruvete ce au defect practicat în direcție transversală, epruvete ce au defect practicat în direcție longitudinală și epruvetă fără defect.

5. Încercarea la presiune interioară a fost concepută cu scopul de a realiza o comparație între valorile presiunii de spargere și a timpului de spargere înregistrate pentru țevi fără sau cu defecte de tip lipsă de material realizate prin prelucrare mecanică cu cele înregistrate pentru țevi fără sau cu defecte practicate în mod controlat.

6. Dispunerea spațială a defectelor pe suprafața exterioară a țevilor testate și dimensiunile geometrice ale defectelor practicate fie în mod necontrolat, fie în mod controlat, a reprezentat, de asemenea, criterii de analiză comportamentală comparativă a țevilor supuse încercărilor experimentale, analizei statistice și evaluărilor numerice.

7. Testarea țevii din polietilenă la solicitări multiple a urmărit determinarea influenței încărcărilor permanente, precum supraîncărcarea din sol, și a celor variabile, în special a celor datorate traficului, precum și cea din presiunea interioară asupra comportamentului țevii îngropate în prezența defectelor ce pot proveni din etapa de încorporare în sol.

10. Materialele utilizate la încercările experimentale au fost: țeavă PEHD apă (Ø 110 × 10), SDR 11 – încercarea la tracțiune și PEHD apă, PE100 (Ø 90 × 5,4) SDR 17, PN 10 – încercarea la presiunea interioară și încercarea la solicitări multiple.

11. Echipamentele folosite în cadrul încercărilor experimentale au fost Sistemul universal de testare LRX Plus (Mașina de testarea a polimerilor - Lloyd - 2,5 kN), pentru încercarea la tracțiune și Echipamentul IPT, model 1751–0313, pentru încercări mecanice țevi din polietilenă.

12. Modul de lucru pentru realizarea încercărilor experimentale este reglementat pentru încercarea la tracțiune prin ISO 527-2 [132], pentru încercarea la presiune interioară prin ISO 1167-1 [119], ISO 1167-2 [155] și ASTM D 1599 [149], pentru recomandări în ceea ce privește încercare la solicitări multiple prin ASTM D2774 [160].

13. Desfășurarea încercărilor experimentale s-a derulat prin parcurgerea etapelor specifice, începând de la prinderea epruvetelor în dispozitivele de prindere și a capacelor pe capetele corpurilor de probă sau săparea mecanizată a șanțului și încheind cu evaluarea parametrilor tensiunea de rupere și alungirea după rupere, presiunea de spargere și timpul de spargere, precum și tensiunea înregistrată în peretele țevii îngropate supusă solicitărilor multiple.

14. Prelucrarea rezultatelor obținute în cadrul încercărilor experimentale a fost redată sub forma parametrilor de analiză statistică sau a printscreen-urilor cu diagramele parametrilor obținute în programul Ansys.

15. Interpretarea rezultatelor încercării la tracțiune a evidențiat, prin diagrama redată în figura 6.32, analiza comparativă a celor nouă caracteristici tehnice evaluate pentru epruvetele Ep1 (T), Ep2 (T), Ep3 (L), Ep4(L) și Ep5 (FD), din care pot se pot formule constatări precum cele referitoare la valorile rezistenței la rupere,  $\sigma_r$ , ale cărei valori sunt: Ep1 (T)  $\rightarrow$  12,658 MPa, Ep2 (T)  $\rightarrow$  13,755 MPa, Ep3 (L)  $\rightarrow$ 18, 91 MPa, Ep4(L)  $\rightarrow$ 19, 711 MPa și Ep5 (FD)  $\rightarrow$ 16,589 MPa.

16. Din analiza statistică Data Analysis (Descriptive Statistics) pentru epruveta cu defect transversal Ep1 (T), redată în tabelul 6.9, se observă că valoarea medie a tensiunii mecanice este 14,7723 MPa, rezultat căruia îi corespunde un nivelul de încredere (95,0 %) de 0,4208.

17. Analiza parametrilor obținuți din evaluarea numerică prin MEF a epruvetelor supuse încercării la tracțiune, prezentați în figurile 6.27 și 6.28, evidențiază valorile parametrului stress intensity obținut în etapa *SOLUTION*, în funcție de dimensiunile caracteristice ale defectelor transversale și ale defectelor longitudinale practicate pe suprafața epruvetelor.

19. Analiza parametrilor obținuți în cadrul evaluării numerice a țevii din PE100 îngropată, redată în figurile 6.61 și 6.62, constituie rezultatul studiului referitor la influența dimensiunilor geometrice ale defectului asupra rezistenței mecanice a materialului țevii. Se evidențiază caracterul vâscoelatic al materialului.

20. Din graficele presiune – timp pentru țevile fără și cu defecte practicate în mod controlat supuse la încercarea la presiune interioară: I.1 (fără defect), II.2C (cu defect orientat în direcție circumferențială) și III.3L (cu defect orientat în direcție longitudinală) se constată că defectul orientat în direcție longitudinală (caz în care tensiunile principale sunt perpendiculare pe conturul crestăturii în direcția axei mari) va conduce la o cedare mai rapidă a țevii decât în cazul în care defectul este orientat în direcție circumferențială.

21. Formele de degradare a materialului polietilenă și a țevilor fabricate din acest material sunt: formarea din radicali macromoleculari, degradarea termică, degradarea termomecanică și degradarea în mediu ambiant.

22. Pentru țeava II.2C (cu defect orientat în direcție circumferențială) a fost calculată adâncumea critică a defectului,  $a_{crit} = 3,1775$  mm.

23. Ruperea unei țevi din polietilenă este caracterizată de parametrii mecanici: durabilitatea și rezistența la rupere.

25. Unul dintre modelele propuse în literatura de specialitate pentru deformarea polietilenei este modelul lui Peterlin, bazat pe elemental structural de bază – microfobrila.

26. Ruperea țevilor din polietilenă cu defecte de tipul incluziunilor, crăpăturilor, amprentelor, micro și macrofisurilor etc., poate fi: fragilă și ductilă. Cele două tipuri de rupere se diferențiază prin durata de solicitare sub presiune, nivelul presiunii interioare, aspectul ruperii etc.

27. Presiunea critică,  $P_{cr}$ , și timpul critic,  $t_{cr}$ , înregistrate deopotrivă pentru țevile din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, cât și pentru țevile din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat, supuse la încercarea la presiune interioară de scurtă durată, depind, în mod esențial, de parametrii geometrici ai țevii și de dimensiunile defectului.

28. Pentru țeava cu defect orientat în direcție longitudinală III.3L a fost înregistrată o valoare a presiunii critice,  $P_{cr}$ , inferioară celei înregistrată pentru țeava cu defect circumferențial II.2C (vezi tabelul 6.27).

29. Valorile maxime ale tensiunii circumferențiale,  $\sigma_c$ , pentru țevile din polietilenă, fără și cu defecte practicate în mod controlat, supuse la încercarea la presiune interioară de scurtă durată, sunt apropiate între ele și de cele din literatura de specialitate.

30. Prin utilizarea unei formule de calcul propusă de [4], a fost determinată durata de viață remanentă a țevilor cu defecte practicate în mod controlat, obținându-se valori diferite, respectiv cca. 83 de ani pentru țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) și 69 de ani pentru țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L) (vezi tabelul 6.28).
# CAPITOLUL 7. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR

## 7.1. Concluzii

Lucrarea este alcătuită din șase capitole, ultimul dintre ele fiind denumit *Concluzii. Contribuții originale. Direcții de continuare a cercetărilor*. Teza de doctorat beneficiază de *Bibliografie* (175 de surse bibliografice) și *Anexe*.

În primul capitol, denumit "*Aspecte generale privind sistemele de conducte din PEHD utilizate la transportul și distribuția apei*" se precizează importanța și actualitatea subiectului tezei de doctorat.

În prezent, transportul și distribuția apei potabile către consumatori se realizează prin intermediul țevilor și elementelor de tubulatură din polietilenă de înaltă densitate (PEHD).

Țevile îngropate din polietilenă sunt supuse unei duble solicitării: compresiune, atât pe verticală cât și pe orizontală, și încovoiere.

Țevile din polietilenă sunt solicitate mecanic și de presiunea fluidului din interiorul conductei, care poate produce deformații diferite în direcția axială, circumferențială și radială.

În cel de-al doilea capitol, intitulat "*Analiza critică a materialelor și tehnologiilor de execuție utilizate la fabricarea țevilor din polietilenă*" este prezentat studiul comparativ a cinci tipuri de țeavă fabricate din materiale precum: fontă (CI), fier ductil (DI), polietilena de înaltă densitate (HDPE), azbociment (AC) și policlorura de vinil (PVC) pentru evidențierea avatajelor oferite de utilizarea țevilor din HDPE.

Rășina termoplastică denumită *polietilenă* – materia primă utilizată la fabricarea țevilor de polietilenă – împreună cu *materialele auxiliare* sau *aditivii* alcătuiesc compondul din care se fabrică prin extrudare țevile.

Pornind de la generalizarea – materiale plastice – și continuând cu particularizarea – polietilena de înaltă densitate – au fost redate particularități ale comportamentului sub solicitările la tracțiune, la oboseală și fluaj.

În capitolul 3, denumit "*Caracteristicile constructive, funcționale și tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă*" este prezentată o sinteză a caracteristicilor constructive, funcționale și tehnologice ce definesc complet elementele de tubulatură și de conexiune care alcătuiesc conductele din polietilenă.

Caracteristicile constructive ale tubulaturii conductelor din polietilenă prezentate sunt: diametrul exterior (nominal),  $D_e$ , și grosimea de perete nominală, s, seria tubulaturii, S, și raportul dimensional standard, SDR.

Inscripționarea sau marcarea țevii PEHD este descrisă, precizându-se denumirea și semnificația datelor pe care le prezintă.

Caracteristicile funcționale specifice conductelor din polietilenă precum: presiunea nominală,  $P_n$ , presiunea maximă de exploatare, *MOP*, presiunea de lucru admisibilă,  $P_{adm}$ , și presiunea de încercare,  $P_{inc}$ , sunt prezentate cu precizarea reglementărilor tehnice în vigoare.

Caracteristicile tehnologice ale tubulaturii conductelor din polietilenă, cele care garantează siguranța în funcționare a sistemelor de conducte, sunt enumerate și definite confrom ISO 161-1, EN 12202, EN 12201-1 și SR EN 805.

În capitolul 4 - "*Calculul analitic al conductelor din polietilenă subterane*" sunt descrise dimensionarea, verificarea, determinarea solicitărilor maxime ale conductelor din polietilenă subterane.

Schema pentru proiectarea conductei din PEHD subterane, prelucrată după [122], redă etapele care trebuie parcurse și sunt parcurse în prezentul capitol cu scopul proiectării sistemelor de conducte subterane, destinate alimentării cu apă (vezi fig. 4.1).

Verificarea ovalizării și evaluarea deformației efective a țevii din PEHD subterane după metoda IMHOFF-GAUBE-ROTTNER reprezintă o aplicație pentru o situație reală, preluată dintr-un șantier pentru montajul unui sistem de alimentare cu apă a centrului comercial pe raza localității Moreni, județul Dâmbovița. Obiectivul studiului constă în determinarea deformației efective,  $\delta_{ef}$ , a țevii din PEHD subterane pentru apă, PE 100 ( $\emptyset$  90 ×5,4), SDR 17. Se constatată că deformația efectivă a țevii are o valoare de 0,56 mm, valoare inferioară valorii de 4,23 mm corespunzătoare deformației maxime admisibilă a țevii,  $\delta_{max}$ , îndeplinindu-se, astfel, condiția din relația.

În capitolul cinci al lucrării, intitulat "*Cercetări experimentale privind caracteristicile mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte pentru distribuția apei*" sunt prezentate cercetările experimentale, efectuate cu scopul de a determinarea comportarea materialului polietilenă PE100 la solicitarea de întindere monoaxială/tracțiune și determinarea comportării materialului polietilenă PE100 la solicitarea la oboseală.

În cadrul încercării la tracțiune, sunt testate un număr de șaisprezece epruvete: 1A1- 4A1 (din direcție circumferențială în dreptul dungilor), 1B1-4B1 (din direcție longitudinală în dreptul dungilor), 1A2-4A2 (din direcție circumferențială între dungi) și 1B2-4B2 (din direcție longitudinală între dungi) și pe baza rezultatelor obținute se realizează propunerea ca pentru cercetările viitoare să fie utilizate, pentru parametrii mecanici evaluați experimental în prezenta lucrare, valorile medii: limita de curgere,  $\sigma_y = 29$ , 6234 MPa, rezistența la rupere,  $\sigma_r = 14,6082$  MPa și alungirea procentuală după rupere,  $\varepsilon_r = 737,7127$  %.

Produsul informatic *SPER* (Procesarea statistică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results), realizat în programul Excel, este conceput pentru analiza comparativă, prin aplicatea metodei Chauvenet, a parametrilor statistici de grupare: media aritmetică,

x, și abaterea standard, s, și parametrul de împrăștiere: dispersia,  $s^2$  pentru tensiunile mecanice ale epruvetelor 1A1, 2A1, 3A1, 4A1, 1B1 și 3A2.

Verificarea normalității distribuției datelor prin aplicarea testului repartiției  $\chi^2$  demonstrează îndeplinirea condiției de verificare:  $\chi_c^2 \le \chi_{\gamma,\alpha}^2$  atât pentru tensiunile mecanice cât și pentru alungirile procentuale, pentru toate cele șase eșantioane evaluate 1A1, 2A1, 3A1, 4A1, 1B1 și 3A2.

La încercarea la oboseală se constată că epruveta solicitată nu se rupe deoarece pentru valori ale tensiunii maxime ale ciclului,  $\sigma_{max}$ , superioare rezistenței la oboseală,  $\sigma_R$ , vâscozitatea ciclică crește cu numărul de cicluri aplicate epruvetei astfel încât la o anumită valoare a lui  $\sigma_{max}$ , egală cu rezistența la oboseală, are loc o creștere a vâscozității ciclice cu timpul, urmată de o descreștere a ei, iar epruveta nu se mai rupe.

Pe termen-lung, conductele din polietilenă nu vor fi afectate de oscilațiile de presiune repetate și frecvente, deoarece polietilena este rezistentă la oboseală (încărcările ciclice).

În capitolul 6 – "Cercetări teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor mecanice ale țevilor din polietilenă folosite la realizarea sistemelor de conducte utilizate pentru distribuția apei, în prezența defectelor" sunt înglobate evaluarea prin patru încercări experimentale a epruvetelor și țevilor cu și fără defecte practicate cu scopul de a stabili influența defectelor asupra rezistenței mecanice a țevilor din polietilenă PE100.

... pentru epruvetele ce prezintă defect transversal, respectiv **Ep1 (T)** și **Ep2 (T)**, s-au înregistrat valori mai mici atât pentru rezistența la rupere cât și pentru alungirea procentuală după rupere decât valorile înregistrate pentru epruvetele cu defect longitudinal.

Parametrul relevant pentru țevile supuse la presiune interioară este tensiunea circumferențială și pentru încercarea la presiunea interioară a țevilor ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat s-au înregistrat valorile:  $\sigma_c = 26,0879$  MPa, pentru **Țeava I (FD)**,  $\sigma_c = 19,2227$  MPa pentru **Țeava II (cu defect)** și  $\sigma_c = 3,4326$  MPa, pentru **Țeava III (cu defect)**. Adâncimea defectului a influențat, în principal, rezultatele obținute.

Prin modificarea valorilor dimensiunilor geometrice al defectului, obținut prin amprentare pe suprafața exterioară a țevii din PE100 supusă la solicitări multiple, s-a evidențiat caracterul vâscoplastic al materialului.

Ing. Ioana-Daniela Manu

Încercarea la presiune interioară de scurtă durată a țevilor din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, a demonstrat că o țeavă din polietilenă PE100 fără defecte se sparge la presiunea critică,  $P_{cr} = 3.8$  MPa, într-un timp critic,  $t_{cr} = 77$  s (Țeava I).

Pentru țeava II.2C (cu defect orientat în direcție circumferențială) a fost calculată adâncumea critică a defectului,  $a_{crit} = 3,1775$  mm.

Experimental, prin încercarea la presiune interioară, s-au evidențiat două tipuri de ruperi: fragilă și ductilă. Ruperea fragilă apare după durate mari de solicitare, se produce fără o deformare importantă a țevii, prin dezvoltarea de fisuri ce au o direcție longitudinală în raport cu axa țevii. Fisurile respective sunt foarte fine și se închid după eliberarea presiunii din țeavă. Ruperea ductilă, denumită și "cioc de papagal", apare la presiuni mari, după perioade scurte de solicitare, se produce prin umflarea țevii concomitent cu subțierea peretelui acesteia până la cedare. Fisura produsă are o direcție perpendiculară pe axa țevii.

Durata de viață remanentă a țevilor cu defecte practicate în mod controlat, a fost determinată prin utilizarea unei formule de calcul propusă de [4], obținându-se valori diferite, respectiv cca. 83 de ani pentru țeava cu defect orientat în direcție circumferențială (țeava II.2C) și 69 de ani pentru țeava cu defect orientat în direcție longitudinală (țeava III.3L).

## 7.2. Contribuții originale

Contribuțiile originale realizate pe parcursul desfășurării activităților de cercetare ale prezentei teze de doctorat sunt:

- Realizarea unei bibliografii ce cuprinde cărți și articole de specialitate utilizate pe parcursul desfășurării activităților de documentare și cercetare pentru a analiza comportamentul țevilor din polietilenă în general și a influenței defectelor asupra rezistenței țevii din polietilenă, în special.
- Realizarea analizei critice a materialului polietilenă prin tabelul 2.1 și 2.5.
- Determinarea deformației efective, δ<sub>ef</sub>, a țevii din PEHD subterane pentru apă, PE 100 (Ø 90 ×5,4), SDR 17 pentru o situație reală, preluată dintr-un şantier pentru montajul unui sistem de alimentare cu apă a centrului comercial pe raza localității Moreni, județul Dâmbovița.
- ► Determinarea valorilor medii ale parametrilor mecanici: limita de curgere,  $\sigma_y = 29,6234$  MPa, rezistența la tracțiune,  $\sigma_{tr} = 14,6082$  MPa și alungirea procentuală după rupere,  $\varepsilon_r = 737,7127$ % pe baza rezultatelor obținute la încercarea la tracțiune a epruvetelor prelevate din materialul polietilenă PE100.
- Realizarea produsului informatic SPER (Procesarea statistică a rezultatelor experimentale/Statistical Processing of Experimental Results) în programul Excel cu care s-a analizat comparativ, prin aplicarea metodei Chauvenet, parametrii statistici de grupare: media

aritmetică, X, abaterea standard, s, și parametrul de împrăștiere: dispersia,  $s^2$ , aplicați tensiunilor mecanice determinate prin încercarea la tracțiune a epruvetelor prelevate din materialul polietilenă PE100.

- Realizarea unei sinteze a metodelor analitice, experimentale și numerice ce vizează distribuția tensiunilor și deformațiilor specifice corespunzătoare zonei defectului din epruvetele și țevile din polietilenă HDPE.
- > Determinarea valorilor factorului de intensitate a tensiunii corespunzător modului I de propagare prin deschidere a fisurii,  $K_I$ , pentru epruvete cu defecte și pentru țevi cu defect longitudinal și cu defect circumferențial supuse încercării la presiune interioară și compararea acestora cu valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii  $K_{Ic} = 0.743$  MPa·m1/2.
- Evaluarea presiunii critice,  $P_{cr}$ , a timpului critic,  $t_{cr}$ , și a tensiunii circumferențiale,  $\sigma_c$ , înregistrate și determinate atât pentru țevile din polietilenă PE100, ce prezintă defecte practicate în mod necontrolat, cât și pentru țevile din polietilenă, ce prezintă defecte practicate în mod controlat, supuse la încercarea la presiune interioară de scurtă durată.

#### Ing. Ioana-Daniela Manu

- Utilizarea criteriului de acceptare Factorul de rezistență reziduală/Remaining Strength Factor (RSF) pentru țevile cu defecte practicate în mod necontrolat cu scopul de a evalua influența unui defect de tipul combinației de *urmă de lovitură/adâncitură* și *smulgere/*dent-gouge și determinarea procentului cu care s-ar reduce presiunea de spargere din valoarea inițială, ca urmare a prezenței defectului (vezi tabelul 6.19).
- Stabilirea celor două regiuni de operare: sigură și potențial nesigură, precum și poziționarea pe curba diagramei a celor două perechi de puncte  $(L_r, K_r)$  corespunzătoare celor două defecte de pe suprafața exterioară a țevilor II.2C și III.3L prin diagrama de evaluare a cedării/Failure Assessment Diagram (FAD) reprezentată pentru țevile ce prezintă defect practicate în mod controlat de tipul *defect asemănător fisurii*/crack-like flaw supuse la încercarea la presiune interioară.
- > Stabilirea prin evaluare numerică a relației de dependență tensiune-adâncime defect și determinarea adâncimii critică a defectului,  $a_{crit}$ .
- Determinarea duratei de viață remanentă a țevilor din polietilenă PE100 ce prezintă defecte practicate în mod controlat, prin utilizarea unei formule de calcul propusă de [4].
- Participarea la conferința internațională "75 YEARS OF ENERGY AND PERFORMANCE IN EDUCATION AND RESEARCH", secțiunea "The Contribution of Mechanical Engineering in Energy Efficiency";
- Participarea la secțiunea poster presentation a conferinței internaționale "9th International Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives ESIS 2024", cu lucrarea "Evaluation of the Influence of Defects on the Strength of PE100 Buried Polyethylene Pipe".
- Publicarea articolelor de specialitate:
  - Polietilena-Polimer Reprezentativ, Modificarea caracteristicilor fizico-mecanice ale polietilenei, International Multilingual Journal of Science and Technology, Vol. 5, Issue 11, November – 2020. [online]. Disponibil pe <u>https://www.imjst.org/wpcontent/uploads/2020/11/IMJSTP29120369.pdf</u>.
  - Internal Pressure Test on HDPE Pipe Ring, Mater. Plast., 59 (3), 2022, 21-30, https://doi.org/10.37358/MP.22.3.5603.
  - The Effect of Rotating-Bending Fatigue on High-Density Polyethylene, Romanian Journal of Petroleum & Gas Technology. [online]. Vol. III (LXXIV, Nr. 1/2022, p. 71 82. DOI: 10.51865/JPGT.2022.01.08
  - The Mechanical Behavior of High-Density Polyethylene under Short-Time Hydraulic Pressure Test Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 14, No. 3, 2024, p. 14062-14068. <u>https://doi.org/10.48084/etasr.7182.</u>

# 7.3. Direcții de continuare a cercetărilor

Cercetările experimentale realizate în cadrul prezentei lucrări au rezolvat parțial problematica influenței defectelor asupra rezistenței mecanice a țevilor din PEHD. Domeniul de cercetare fiind extrem de vast, pot fi recomandate câteva direcții de continuare a cercetărilor:

- Efectuarea de încercări experimentale pe epruvete și țevi în zonele critice și anume: zonele cu discontinutăți geometrice, zonele de îmbinare sudată, zonele de îmbinare cu piese metalice;
- Elaborarea de metodologii de evaluare a capacității portante a țevilor din PEHD, similare cu cele pentru țevile metalice;
- Continuarea cercetării durabilității epruvetelor din PEHD supuse încercării la oboseală prin încovoiere rotativă;
- Efectuarea de încercări experimentale pe țevi din PEHD care prezintă defecte dispuse pe suprafața interioară;
- > Cercetări privind folosirea țevilor PEHD în transportul hidrocarburilor.

# **BIBLIOGRAFIE**

[1]. TIEN S. W., CHIU C., CHUNG Y., TSAI C. and CHANG C. (2007), Analysis of Production Process Improvement with Life Cycle Assessment Technology: Example of HDPE Pipe Manufacturing, *Asian Journal on Quality*, Vol. 8, nr. 2, pp. 32-56 [Accesat 22 februarie 2024]. Disponibil pe <u>https://doi.org/10.1108/15982688200700013</u>.

[4]. ALUCHI V., Cercetări privind caracteristicile de exploatare ale conductelor din polietilenă utilizate la distribuția gazelor naturale, Teză de doctorat, Ploiești, 2013.

[5]. SCĂRLĂTESCU D. D., Contribuții la studiul tuburilor din materiale avansate utilizate în rețelele de alimentare cu apă, Teză de doctorat, Brașov, 2019. [Accesat 22 februarie 2024]. Disponibil pe https://www.unitbv.ro/documente/cercetare/doctorat-postdoctorat/sustinere-teza/2019/scarlatescu-daniel/3.Rezumat\_Scarlatescut.A.pdf.

[6]. COCARD M., Integritatea structurală a componentelor din materiale termoplastice îmbinate prin sudare, Teză de doctorat, Timișoara, 2015. [Accesat 22 februarie 2024]. Disponibil pe <u>https://dspace.upt.ro/jspui/bitstream/123456789/260/3/BUPT\_TD\_Cocard%20Marius.pdf</u>.

[7]. JAHANI S., Characterisation and analysis of polyethylene pipes and polymers in water pressure pipe applications, Loughbourgh University, 2019. [Accesat 22 februarie 2024]. Disponibil pe <u>https://hdl.handle.net/2134/37165</u>.

[8]. PUPĂZESCU Al., Stabilitatea conductelor îngropate din țevi de polietilenă, Revista de materiale plastice. [online]. 2007, Vol. 44 (2). Disponibil pe https://revmaterialeplastice.ro/pdf/MP2\_2007\_2.pdf.

[9]. CHIRICA Ș., Contribuții la cercetarea fenomenului "Pierderi de apă" din rețelele hidroedilitare, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Facultatea de Hidrotehnică, Geodezie și Ingineria Mediului, Iași, 2019.

[10]. KLEINER Y., ADAMS B. J., ROGERS, J. S. (2001). Water Distribution Network Renewal Planning, Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 15, nr. 1, pp. 15–26. [Accesat 22 februarie 2024]. DOI:10.1061/(asce)0887-3801(2001)15:1(15).

[11]. NASIRI S., KHOSRAVANI M. R., Failure and fracture in polyethylene pipes: Overview, prediction methods, and challages, *Engineering Failure Analysis*, vol. 152, Oct., 2023, Art. no. 107496. [Accesat 22 februarie 2024]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107496.

[12]. SEDMAK S., GLUBOVIK Z., MURARIU A. C., SEDMAK AL., Numerical simulation of tensile testing of PE80 polymer specimens, *Thermal Science*, Vol. 22, pp. 203. [online], 2017, Disponibil pe

https://www.researchgate.net/publication/320208162\_Numerical\_simulation\_of\_tensile\_testing\_of\_ PE\_80\_polymer\_specimens.

[13]. DRĂGHICESCU H. T., SCUTARU M. L., VLASE S., Finite-Element-Analysis-Based Study of Failure Phenomenon in HDPE Pipes, MDPIL Journal, Materials, Vol. 16, nr. 21, art. 6944. noiembrie 2023. DOI: <u>10.3390/ma16216944</u>.

[14]. JANSON, Lars-Eric., *Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal*. 3. Stockholm, Borealis, 1999.

[15]. PETROFF L. J., Occasional and Recurring Surge Design Considerations for HDPE pipe, Pipelines 2013: Pipelines and Trenchless Construction and Renewals-A Global Perspective. [online].
Iunie 2013, Pipeline Infrastructure: Session A-5, pp. 161-170, [Accesat 27 ianuarie 2024].
DOI: <u>10.1061/9780784413012.014</u>.

[17]. \*\*\*SR 6819 – "Alimentări cu apă – Aducțiuni – Studii, prescripții de proiectare și de execuție".
[19]. Dicționar Trenchless Rehabilitation. [online]. Publicat 22 septembrie 2017, ultima actualizare 31 octombrie 2023. Disponibil pe <u>https://www.trenchlesspedia.com/definition/3419/tuberculation.</u>
[20]. \*\*\* ASTM D1248 – "Standard Specification for Palvethylana Plantica Futurica Materiala".

[20]. \*\*\* ASTM D1248 – "Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials".
[21]. PE Pipe – Design and Installation, AWWA *Manual M55*. 1. Denver, Science and Technology, SUA, 2006.

[22].<u>https://www.pe100plus.com/PE-Pipes/Technical-guidance/Trenchless/Methods/Pipe-</u> Rehabilitation/Slip-lining-i1306.html. [online]. 2018. Disponibil pe www.pe100plus.com.

[23]. KHADEMI-ZAHEDI R., M. S., Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes, *ScienceDirect*. [online]. Vol. 4, nr. 1, pp. 48-58, 2019. Disponibil pe <u>https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.05.001</u>.

[24]. Plastic Pipe Institute (PPI), Handbook of Polyethylene Pipe, Second Edition, 2008.

[25]. Technical notes - Above-ground high density polyethylene (HDPE) pipe. Spokane, Washington. Natural Resources Conservation Service. [online]. Disponibil pe https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WA/ENG\_TECH\_NOTE\_12.pdf.

[30]. Instrucțiuni generale pentru montaj, lucrări de terasament și pozare pentru rețele PE, TeraPlast. [online]. Disponibil pe <u>https://www.teraplast.ro/wp-content/uploads/2021/09/Instructiuni-de-montaj-LUCRRI-DE-TERASAMENT-I-POZARE-pentru-reele-PE-2021.pdf</u>.

[33]. GONZALES M., MACHADO R., GONZALES J., Fatigue Analysis of PE-100 Pipe Under Axial Loading, *Pressure Vessels and Piping Conference*. [online]. 21 mai 2012, PVP2011-57631, pp. 905-911. Disponibil pe <u>https://doi.org/10.1115/PVP2011-57631</u>.

[34]. RISITANO G., GUIGLIELMINO E., Evaluation of mechanical properties of polyethylene for pipes by energy approach during tensile and fatigue tests, Procedia Structural Integrity. [online]. 2018, Vol. 13, pp. 1663-1669. Disponibil pe https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618305894?via%3Dihub.

[38]. BURDUCEA C., LECA. A., *Conducte și rețele termice*, Editura Tehnică, București, 2018.

[42]. BALINT, I., POLIETILENA o nouă masă plastică obținută în țară, *Știință și Tehnică nr.9*, 1961, pp. 20.

[45]. RENDELL F., *Water and wastewater project development*, Thomas Telford Publishing, 1999, pp. 311.

[46]. "Știință și Tehnică", nr.5, din anul 1957, la pagina 2.

[47]. CALOS S., CONTAȘEL M.A., *Ghid rețele de distribuție a apei Polietilenă*, Combinatul Poligrafic, Chișinău, 2008.

[48]. WHELTON A. J., NGUYEN T., Contaminant Migration from Polymeric Pipes used in Buried Potable Water Distribution Systems: A Review, Critical Review in Environmental Science and Technology. [online]. Vol. 43, nr. 7, pp. 679-751, <u>doi: 10.1080/10643389.2011.627005</u>.

[49]. CHASIS D. A., Plastic Piping Systems, Second Edition, Industrial Press Inc., 1988, pp. 11.

[51]. \*\*\* ISO 4427-2 – "Plasics piping systems – Polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply – Part 2: Pipes".

[55]. **MANU I-D**., Polietilena-Polimer Reprezentativ, Modificarea caracteristicilor fizico-mecanice ale polietilenei, International Multilingual Journal of Science and Technology, Vol. 5, nr. 11, noiembrie – 2020. [online]. Disponibil pe <u>https://www.imjst.org/wp-content/uploads/2020/11/IMJSTP29120369.pdf</u>.

[56]. \*\*\* ISO 527-1 – "Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles".
[57]. CAMPO E. A., Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties from Different Standards. [online]. William Andrew Inc., USA, 2008, pp. 41.

[58]. ZECHERU Gh., DRĂGHICI Gh., *Elemente de știința și ingineria materialelor*, Editura ILEX și Editura Universității din Ploiești, Vol. 1, 2001, pp. 241, 244.

[64]. DJEBLI A., BENDOUBA M., ş.a. Experimental Analysis and Damage Modeling of High-Density Polyethylene under Fatigue Loading, *Acta Mecanica Solida Sinica*. [online]. Vol. 29, nr. 2, aprilie 2016, Publicat de AMSS Press, Wuhan, China. Disponibil pe <u>https://doi.org/10.1016/S0894-9166(16)30102-1</u>.

[65]. Institutul de proiectare, cercetare științifică și tehnică de calcul în construcții, IPCT – SA, *Ghid privind proiectarea, execuția și exploatarea sistemelor de alimentare cu apă și canalizare utilizând conducte din PVC, polietilenă și polipropilenă*, Indicativ: GP – 043/99, Editura Fast Print, București, 2005.

[68]. ARNDT K. F., LECHNER M. D., Polymers solids and Polymer Melts - Mechanical and Thermomechanical Properties of Poymers. [online]. 2014, DOI: 10.1007/978-3-642-55166-6.

[69]. GRELLMANN W., SEIDLER S., *Polymer Testing*. 2. Carl Hanser Verlag Publishers, Munich, 2013. [online]. Disponibil pe <u>https://doi.org/10.3139/9781569905494</u>.

[70]. Jana Laboratoires Inc., Technical Report – Fatigue of Plastic Water Pipe: A Technical Review with Recommendations for PE 4710 Pipe Design Fatigue, 2012, pp. 5. [online]. Disponibil pe <u>https://conduitcalc.plasticpipe.org/pdf/mid-fatigue-plastic-water-pipe-01-12-12.pdf.</u>

[71]. \*\*\* NFT 51 120-4 – "Plastics and Composites – Determination of the Bending Fatigue Properties – Part 4: Four Point Bending Test on Unsecured Test Pieces".

[73]. \*\*\* ISO 1143 – "Mettalic materials – Rotating bar bending fatigue testing".

[74]. Institutul Român de Standardizare, *Colecția de Standarde Românești Comentate*, Materiale Plastice, România, 1994, vol. 1.

[75]. \*\*\* ISO 554 – "Standard atmospheres for conditioning and/or testing Specifications"

[76]. **MANU I-D.,** The Effect of Rotating-Bending Fatigue on High-Density Polyethylene, Romanian Journal of Petroleum & Gas Technology. [online]. Vol. III (LXXIV), nr. 1/2022, pp. 71 – 82. <u>DOI:</u> 10.51865/JPGT.2022.01.08.

[77]. MOCANU R. D., BUDESCU M., BLIUC I., CARACOSTEA A., Încercări distructive ale elementelor metalice și ale materialelor nemetalice, Editura Tehnică, 1982, vol. 1, pp. 189, 253.

[78]. IGN 4-37-02, *Design Against Surge and Fatigue Conditions For Thermoplastic Pipes*. [online]. UK Water Industry, pp. 12, 1999. Disponibil pe <u>https://www.water.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/ign-4-37-02.pdf</u>.

[79]. MAMOUN M. M., Development of an Accelerated SCG Test Method for Polyethylene (PE) Pipe and Correlation with Elevated Temperature Hydrostatic Stress Rupture Test Method ASTM D 1598, Plastics Pipe Institute. [online]. Hydrostatic Stress Board: Des Plaines, IL, 2006.

[80]. AMJADI, M., FATEMI A., Creep behavior and modeling of high-density polyethylene (HDPE), Polymer Testing. [online]. Vol. 94, 2021, 107031. Disponibil pe https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107031.

[90]. Normativ privind proiectarea, execuția și exploatarea sistemelor de alimentare cu apă și canalizare ale localităților, Indicativ NP 133-2022, Volumul I – Sisteme de alimentare cu apă.

[91]. Popescu D., Sisteme de conducte, Editura PIM, Iași, 2008, p. 10.

[92]. <u>https://www.apa-gaz-canalizare.ro/alimentare-cu-apa-potabila/</u>

[93].https://conduitcalc.plasticpipe.org/pdf/mid-pe-field-manual-municipal-water-applications.pdf.

[94]. \*\*\* SR 4163-3 – "Alimentări cu apă. Rețele de distribuție. Prescripții de execuție și exploatare".
[95]. Norme tehnice pentru proiectarea, executarea și exploatarea sistemelor de alimentare cu gaze naturale, din 10.05.2018.

[95]. \*\*\* ISO 3126 – "Plastics piping systems – Plastics components – Determination of dimensions".

[96]. \*\*\* ISO 4427-3 – "Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure — Polyethylene (PE) — Part 3: Fittings".

[97]. Rețele edilitare din materiale plastice - Îndrumar de proiectare și de bună execuție – Pipelife. [105]. \*\*\*ISO 161-1 – "Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids - Nominal outside diameters and nominal pressures – Part 1: Metric series".

[106]. \*\*\* ISO 161-2 – "Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids – Nominal outside diameters and nominal pressures – Part 2: Inch – based series".

[107]. \*\*\* ISO 11922 -1 – "Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids – Dimensions and tolerances – Part 1: Metric series".

[108]. \*\*\* EN 12201-2 – "Plastics piping for water supply – Polyethylene (PE), Part 2: Pipes".

[110]. \*\*\* ISO 4065 – "Thermoplastics pipes – Universal wall thickness table".

[111]. PLASTICS PIPE INSTITUTE, Polyethylene Piping Systems Field Manual for Municipal Water Applications, *M&I Division*, 2009.

[112]. \*\*\* EN 12202 – "Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under presssure – Polyethylene (PE)".

[113]. \*\*\* EN 12201-1 – "Plastics piping systems for water supply – Polyethylene (PE), Part 1: General".

[114]. \*\*\* SR EN 805 – "Alimentări cu apă. Condiții pentru sistemele și componentele exterioare clădirilor".

[116]. **MANU, I-D.,** Studiul actual al cercetărilor privind influența defectelor asupra rezistenței mecanice a conductelor din polietilenă, Raport de cercetare științifică nr. 1, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 21 februarie 2020, pp.10.

[117]. \*\*\* EN ISO 12162 – "Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications — Classification, designation and design coefficient".

[118]. \*\*\* DIN 8075 –"Polyethylene (PE) pipes – General quality requirements and testing".

[121]. MATEESCU Th., *Conducte din mase plastice pentru sisteme de utilități urbane*, Editura S.C. Revox, Bistrița, 2005.

[122]. \*\*\* EN 1295-1 – "Structural design of buried pipelines under varoius conditions of loading – Part 1: General requirements."

[124]. \*\*\*SR EN ISO 14688-2 – "Investigații și încercări geotehnice – Identificarea și clasificarea pământurilor – Partea 2: Principii pentru o clasificare".

[125]. \*\*\*SR EN 1610 – "Execuția și încercarea racordurilor și rețelelor de canalizare".

[126]. \*\*\* ATV-DVWK-A 127E - "Static Calculation of Drains and Sewers".

[127]. WATKINS R. K., ANDERSON L. R., Structural Mechanics of Buried Pipes, *CDC Press*, 1999. [online]. Disponibil pe <u>Structural Mechanics of Buried Pipes - Google Play</u>.

[130]. HÂNCU C.D., FLOREA M., EFREM V., *Tehnologia lucrărilor de construcții și mașini de construcții*, Ovidiu University Press, 2012.

[132].\*\*\* ISO 527-2 – "Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics".

[138]. ADBELKADER D., MOSTEFA B., AID A., ş. a., Fatigue Life Prediction and Damage Modelling of High-density Polyethylene under Constant and Two-block Loading, *Procedia Engineering*, vol. 101. nr. 4, 2005, pp. 2-9. [online]. Disponibil pe: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.02.002.

[140]. POPA A., PUPĂZESCU Al., TĂNASE M., *Lucrări experimentale de mecanică*, Editura Universității Petrol-Gaze din Ploiești, 2017, pp. 18.

[141]. Critical Values of the Student's t Distribution. [online]. Disponibil pe: <u>https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3672.htm</u>.

[142]. \*\*\* EN ISO 6259-1 – "Thermoplastics pipes – Determination of tensile properties – Part 1: General test method".

[155]. \*\*\*ISO 1167-2 – "Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure – Part 2: Preparation of pipe test pieces".

[156]. **MANU I-D.**, PETRESCU M. G., ZISOPOL D. G., RAMADAN I. N., ILINCA C. N., The Mechanical Behavior of High-Density Polyethylene under Short-Time Hydraulic Pressure Test Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 14, nr. 3, 2024, pp. 14062-14068. [online]. DOI: https://doi.org/10.48084/etasr.7182.

161]. BAI Q., BAI Y., RUAN W., *Advances in Pipes and Pipelines: Flexible Pipes*, Nonmetalic Bonded Flexible Pipe Under Internal Pressure, cap. 27, ISBN:9781119041269, 2017, pp. 429-454, Scrivener Publishing LLC. [online]. Disponibil pe https://doi.org/10.1002/9781119041290.ch24.

[174]. \*\*\* ISO 9080 – "Plastic piping and ducting systems - Determination the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation".

[175]. ABDELWAHAB Z., ABDELKADER B., ş. a., Investigation of the Notch Impact on the Internal Pressure Resistance of HDPE Pipes: An Experimental and FEEA Study, Research Square. [online]. Disponibil pe: <u>https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2246408/v2.</u>